

**Alessandro Bemporad** 

INAF - Osservatorio Astrofisico di Torino



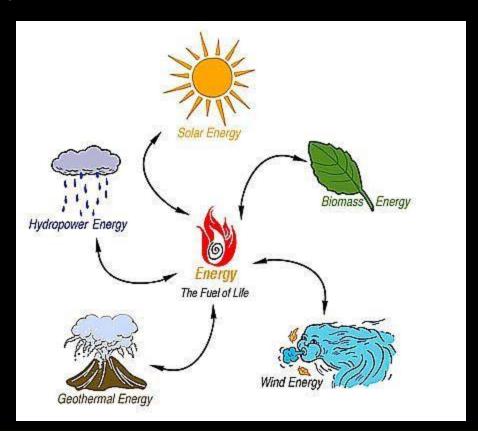
#### **Sommario**

- Perché studiare il Sole?
- Cosa conosciamo del Sole?
  - L'interno del Sole: produzione e trasporto dell'energia
  - L'esterno del Sole: struttura ed attività dell'atmosfera
- Effetti dell'attività solare sulla Terra
  - Magnetosfera terrestre e Aurore
  - Tempeste Geomagnetiche
  - Sole e climatologia terrestre





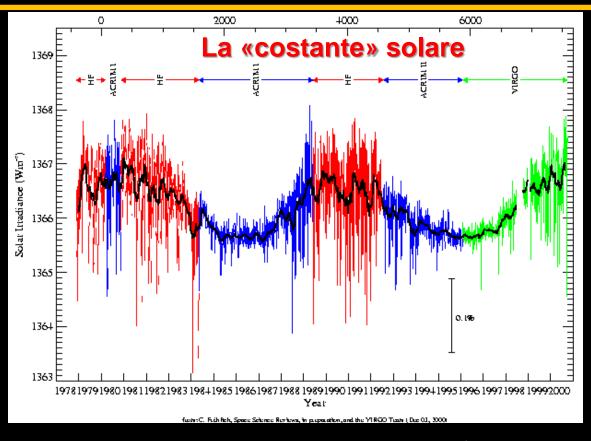
- Sole come fonte di energia
  - 1) direttamente sotto forma di radiazione elettromagnetica,
  - 2) indirettamente sotto forma di combustibili fossili (petrolio, carbone), energia eolica (vento), idroelettrica, da biomassa.



L'unica forma di energia non di origine solare è quella geotermica.







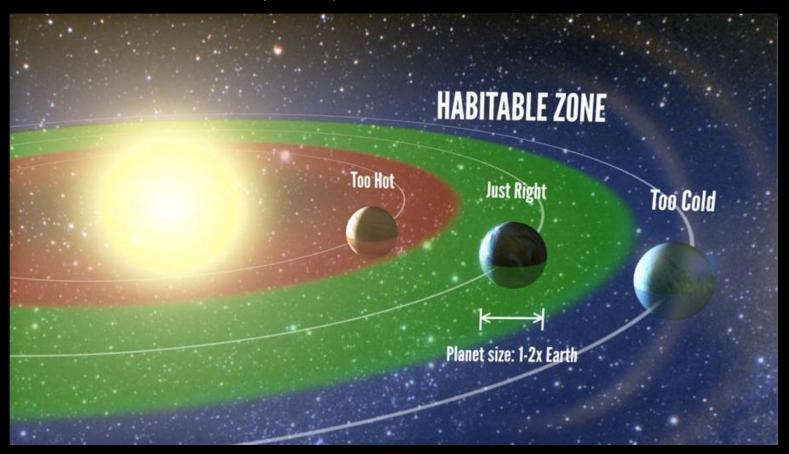
Il Sole fornisce il 99.998% dell'energia al clima terrestre (il resto viene dalle sorgenti geotermiche). Questa energia arriva soprattutto come radiazione.

→ la «costante» solare (1.367 kW/m²) varia dello 0.15 % con periodo di 11 anni, la misura della variabilità è stata possibile solo durante l'era spaziale.

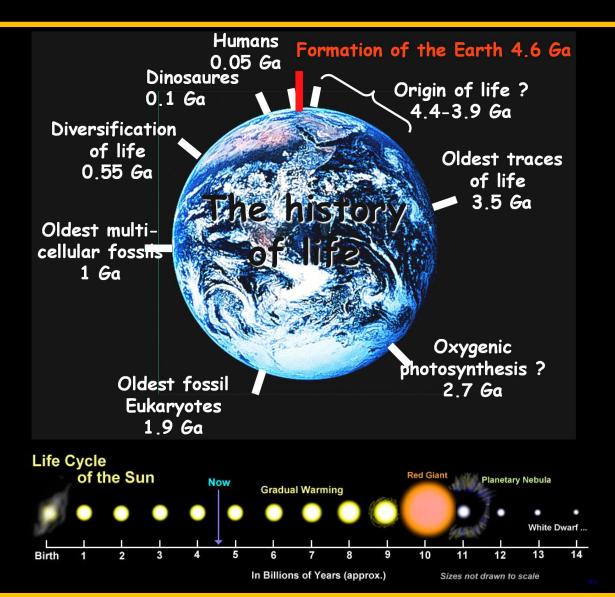


#### Capire l'origine della vita e la sua sostenibilità

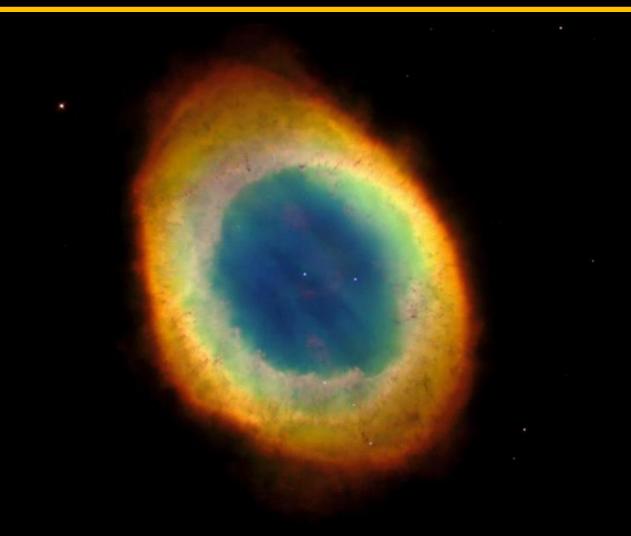
Le caratteristiche del sole sono tali da permettere (unitamente alle caratteristiche del pianeta) la vita → **zone di abitabilità** 









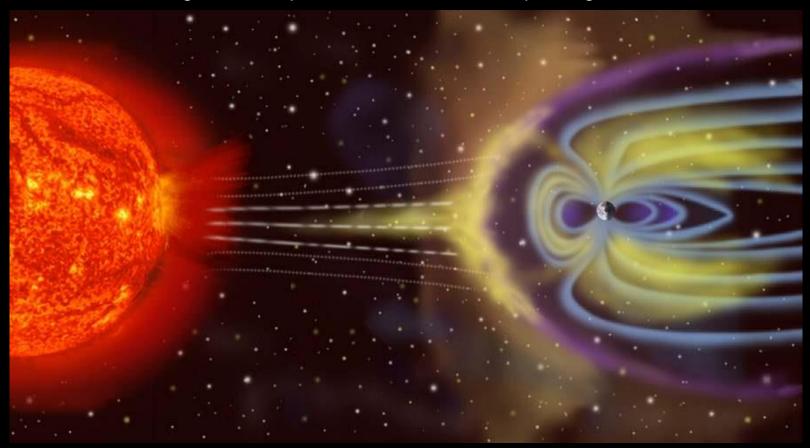


La fine del Sole: nebulosa planetaria e nana bianca (foto: Ring Nebula)

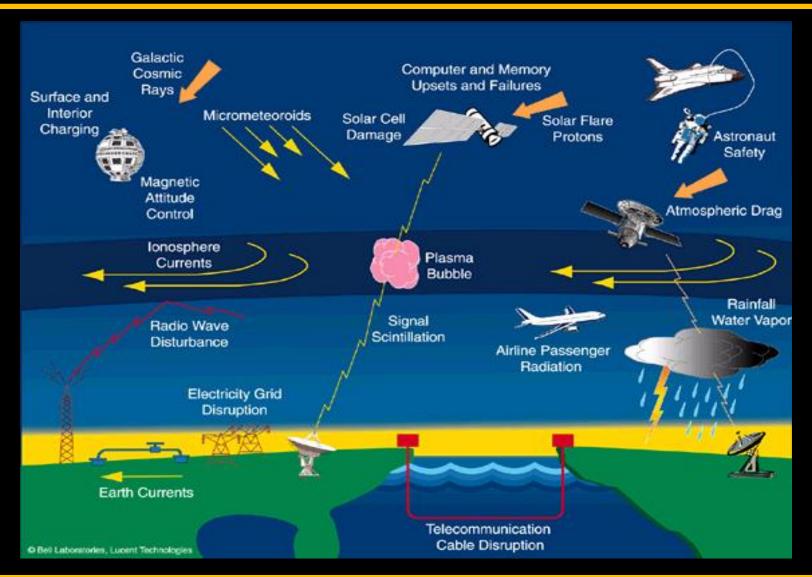


Capire e prevedere gli eventi di Meteorologia Spaziale

Le eruzioni solari investono spesso la Terra con un flusso di particelle ad alta energia, solo in parte schermate dal campo magnetico terrestre



# Perché la meteorologia spaziale?





#### Capire la nascita e la vita di tutte le stelle

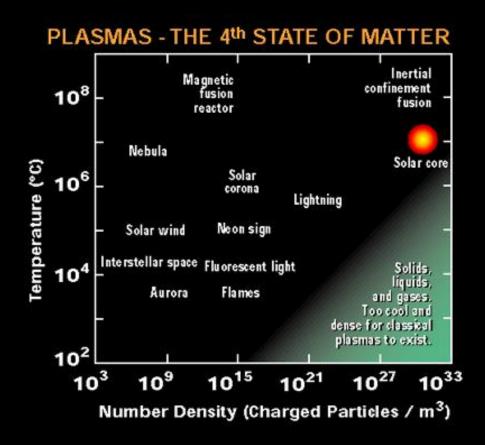
Tutti i modelli di **evoluzione stellare** sono «versioni modificate» dei nostri modelli di evoluzione del Sole

#### Life Cycle of a Star $M < 8 M_{sun}$ White Average Dwarf Star Red Giant Planetary Nebula $8 M_{sun} < M < 40 M_{sun}$ **Neutron Star** Stellar Nebula $M > 40 M_{sun}$ **Massive Star** Red Supernova Black Hole Supergiant

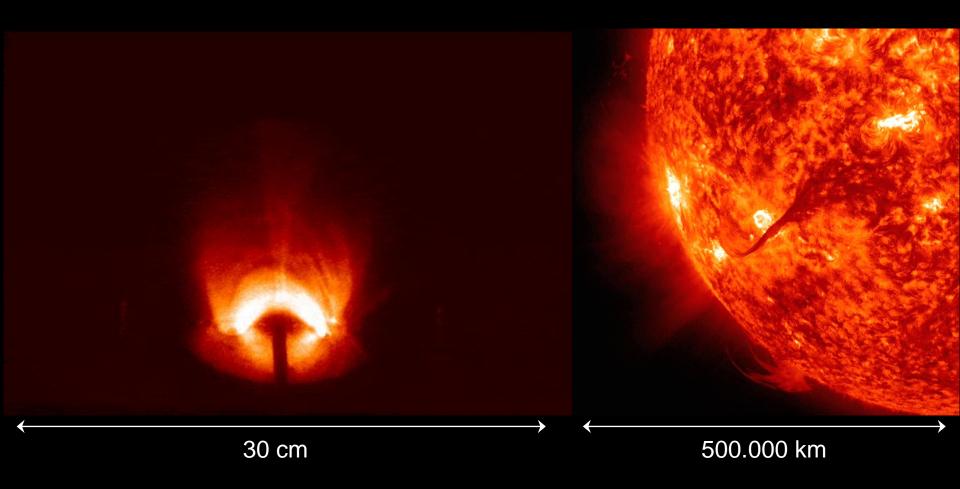


#### Capire la fisica del plasma

Il 99.999% dell'universo visibile è fatto di **plasma**, così come il Sole → studiare il Sole vuol dire studiare la fisica del 4° stato della materia di cui è fatto tutto l'universo









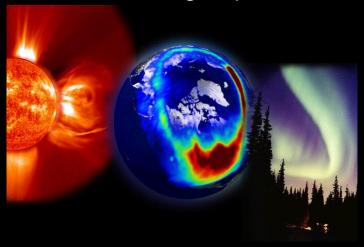
#### Relazione con il clima terrestre



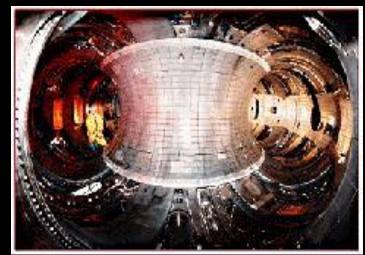
Il Sole come una stella



#### Meteorologia spaziale



Il Sole come laboratorio di fisica







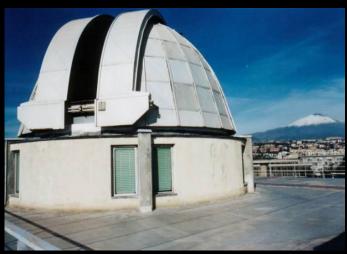
## Cosa conosciamo del Sole?



## Come si osserva il Sole?

Da Terra... fin da Galileo!





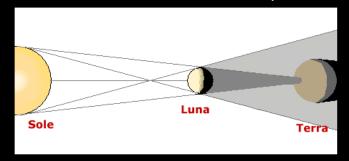
Dallo spazio... solo dagli anni '70. Solo dallo spazio è possibile monitorare il sole 24h su 24.





Durante le eclissi (per studiarne l'atmosfera esterna)





Missione SOHO



Missione Hinode

Missione STEREO

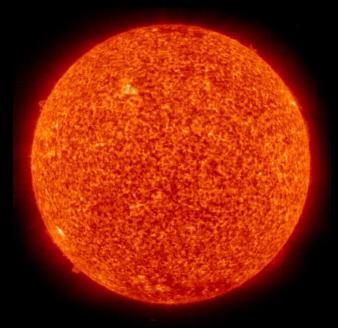




#### Il Sole in cifre

- ☐ Il Sole si trova in un braccio spirale della nostra Galassia (Via Lattea), chiamato braccio di Orione, a circa 30000 anni-luce dal centro.
- ☐ Il Sole ruota intorno al centro della Galassia in 225 milioni di anni. Quindi il Sistema Solare ha una velocità di 230 km/s (o 830.000 km/h).





Massa:  $2 \times 10^{30} \text{ kg} = 333,000 \text{ volte la massa della Terra}$ 

**Diametro:** 1,400,000 km = 109 volte il diametro della Terra

Densitá: 1.4 volte la densità dell'acqua

Composizione: PLASMA: 74% H + 25% He + 1% Metalli

Temperatura della superficie: 5,800 K

Temperatura dell'atmosfera esterna (corona): >1,000,000 K

Temperatura al centro: 15,000,000 K

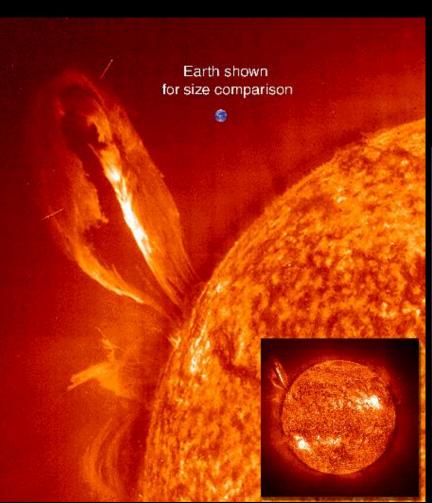
Energia totale emessa: 4 x 10<sup>26</sup> W (5 minuti della radiazione

che investe la Terra sono pari al consumo mondiale annuale

di energia elettrica).



# Ma quanto è grande il Sole?



Se il sole avesse le dimensioni di una palla da basket, la terra sarebbe una "goccia" del diametro di 2.2 mm e sarebbe ad una distanza di circa 50 m.



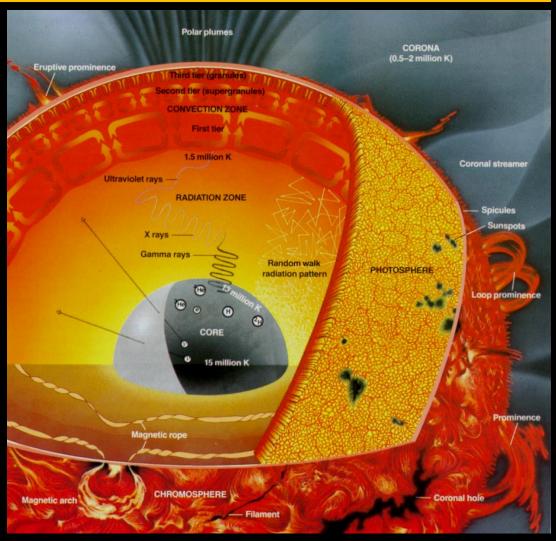


## L'interno del Sole

## La Struttura interna del Sole

#### Nocciolo 0 ⇒ 0.25 R<sub>☉</sub>

- L'energia viene prodotta
- La fusione nucleare trasforma 7•10<sup>11</sup> kg di idrogeno in elio al secondo
- **■** Zona Radiativa  $0.25 \Rightarrow 0.75 R_{\odot}$ 
  - l'energia viene trasportata per radiazione
  - Sebbene i fotoni prodotti viaggino alla velocità della luce, vengono deviati così tante volte dal denso materiale che impiegano circa 100000 anni per raggiungere la superficie
- Zona Convettiva 0.75 ⇒ 1 R<sub>☉</sub>
  - L'energia viene trasportata per convezione in superficie, come in una pentola d'acqua che bolle



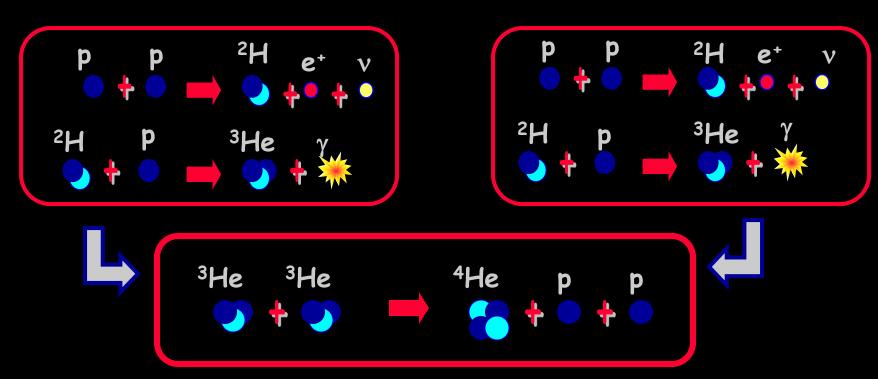
La temperatura nel sole va da 15.000.000 K (nucleo) a 5000 K (fotosfera)





#### Interno del Sole: il nocciolo

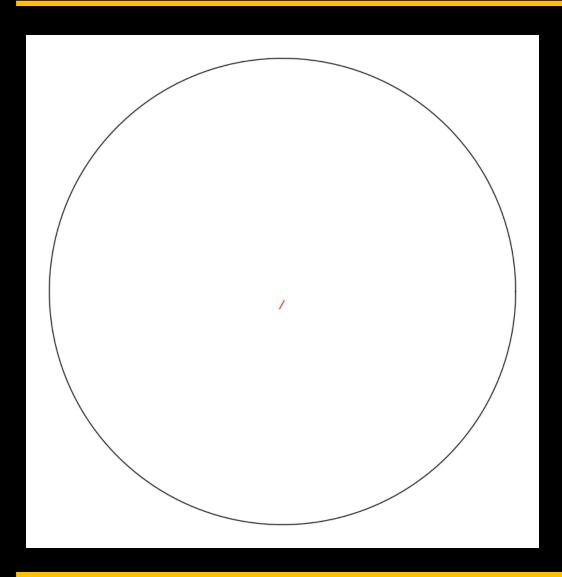
La pressione prodotta nel nucleo dal plasma solare (10<sup>11</sup> atmosfere) riscalda il plasma fino a 15 milioni di gradi, temperatura alla quale si innesca una reazione nucleare (FUSIONE) che trasforma 4 protoni in un nucleo di Elio rilasciando energia:



La fusione nucleare trasforma 7•10<sup>11</sup> kg di idrogeno in elio al secondo. Circa lo 0.7% di questa massa viene trasformato in energia  $(E = m c^2)$ 



## Interno del Sole: zona radiativa



Il nucleo del Sole è un gas con una densità di 150 g/cm³ (150 volte la densità dell'acqua, 16.6 volte la densità del piombo)

- → i fotoni urtano continuamente con i gas circostanti
- → a seguito delle collisioni con la materia il cammino percorso dai fotoni è una somma di direzioni casuali detto random walk
- → in totale i fotoni impiegano tra
   10<sup>5</sup> e 10<sup>6</sup> anni per arrivare alla superficie del Sole
- → dopo ogni collisione i fotoni perdono un po' di energia

Come si calcola questo tempo?



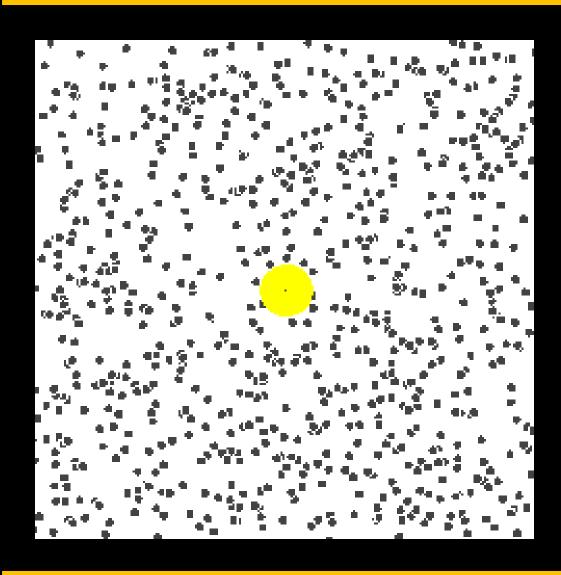


## Random walk: un po' di storia

Il concetto di «camminata casuale» («random walk») è collegato al fenomeno del moto browniano: nel 1827 Robert Brown osservò che particelle di polline immerse in acqua si muovono continuamente... ma non seppe spiegare il perché..



# Random walk: un po' di storia



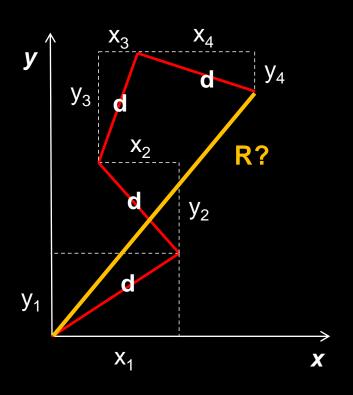
del L'interpretazione fenomeno fu dimostrata nel 1905 da Albert Einstein: le particelle di polline (visibili) urtano continuamente con le molecole di acqua circostanti (non visibili) che si muovono continuamente per agitazione termica → spingono i grani di polline a seguire un cammino casuale.





## Random walk: un po' di teoria

Consideriamo il moto di una particella in un piano (x, y). Supponiamo che tra una collisione e la successiva la particella che stiamo osservando percorra sempre la stessa distanza d, ma ogni volta in una direzione casuale diversa. Allora la distanza totale R dopo 4 passi è



$$X_1 > 0, y_1 > 0;$$
  $X_2 < 0, y_2 > 0$   
 $X_3 > 0, y_3 > 0;$   $X_4 > 0, y_4 < 0$ 

$$R^{2} = x^{2} + y^{2} =$$

$$= (x_{1} + x_{2} + x_{3} + x_{4})^{2} + (y_{1} + y_{2} + y_{3} + y_{4})^{2} =$$

$$= x_{1}^{2} + x_{2}^{2} + x_{3}^{2} + x_{4}^{2} + 2x_{1}x_{2} + 2x_{1}x_{3} + \dots +$$

$$+ y_{1}^{2} + y_{2}^{2} + y_{3}^{2} + y_{4}^{2} + 2y_{1}y_{2} + 2y_{1}y_{3} + \dots =$$

$$= d^{2} + d^{2} + d^{2} + d^{2} + d^{2} + 2x_{1}x_{2} + 2y_{1}y_{2} + \dots \sim 4 d^{2}$$

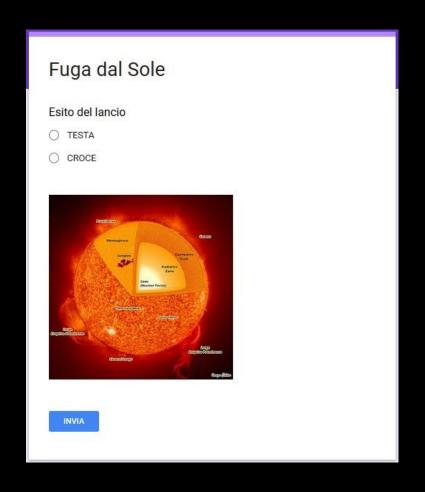
perché tutti i doppi prodotti contengono quantità positive e negative che tendono a cancellarsi tra loro quando il numero di passi *N* diventa molto grande.

$$\rightarrow$$
 dopo *N* passi è  $R^2 = N d^2$  ossia

$$R = \sqrt{N} d$$

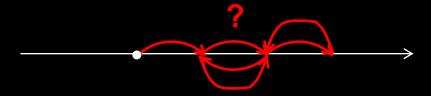


#### Random walk: attività



Facciamo una verifica sperimentale!

Consideriamo un caso ancora più semplice di un corpo che si può muovere solo lungo una retta.

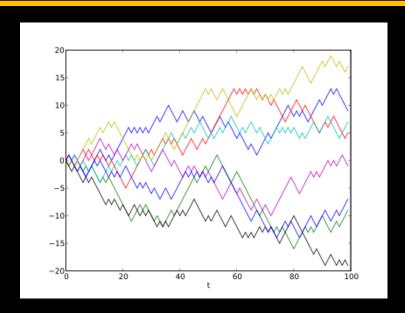


Ad ogni passo tiriamo una moneta: se esce testa il corpo fa un passo a destra, se invece esce croce va a sinistra...

Dopo *N* passi di quanto si è spostato dal punto iniziale?



#### Random walk: attività



In ogni lancio, la probabilità che esca testa è uguale alla probabilità che esca croce. Dopo *N* lanci ci aspettiamo che

N(testa) ~ N(croce) ~ N/2

Il punto però è proprio questo però sopra non compare il segno di uguaglianza, ma di circa uguale.... **Perché?** 

Se fosse esattamente N(testa) = N(croce) = N/2 allora il corpo non andrebbe da nessuna parte e alla fine sarebbe sempre nella posizione da cui è partito. Ma in statistica ci sono sempre delle fluttuazioni rispetto al valore atteso.

Sono proprio queste fluttuazioni a far sì che alla fine il corpo si sposti, e lo spostamento dopo *N* lanci è (circa) proporzionale alla radice quadrata di *N*!

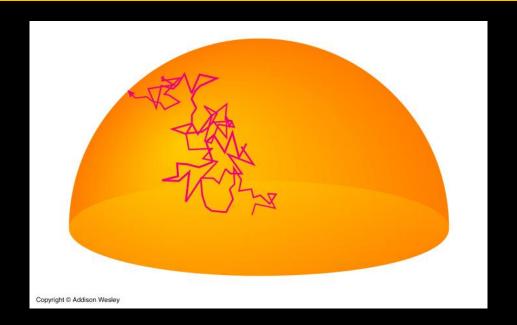
Alla fine risulta quindi

 $|N(testa) - N(croce)| \sim \sqrt{N}$ 





#### Random walk dei fotoni solari



$$R = \sqrt{N} d$$



$$N=\frac{R^2}{d^2}$$

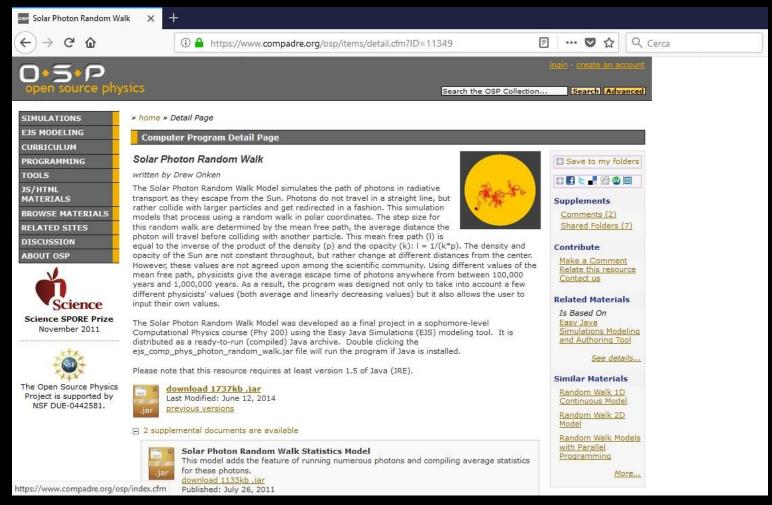
Per l'interno del Sole mediamente d (detto libero cammino medio) è circa  $d \sim 10^{-4}$  m = 0.1 mm  $\rightarrow$  data la distanza  $R = R_{sun}$  che deve percorrere il fotone, come si calcola il numero di passi N?

**RISPOSTA:** il numero totale di passi N che ogni fotone deve compiere per arrivare fino in superficie è  $N = (R_{sun}/d)^2 = 10^{26}$  passi! E quant'è la distanza totale s percorsa dal fotone?

**RISPOSTA:**  $s = Nd = 10^{22} \text{ m} \sim 10^{13} R_{sun}$ . Propagandosi alla velocità della luce (~300000 km/s) il fotone impiega  $t = 10^6$  anni per percorrere questa distanza ed arrivare alla superficie!



## Interno del Sole: random walk applet

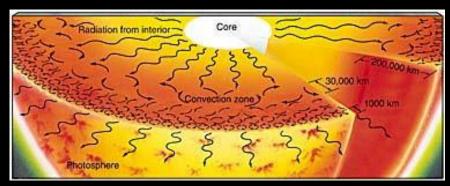


https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=11349



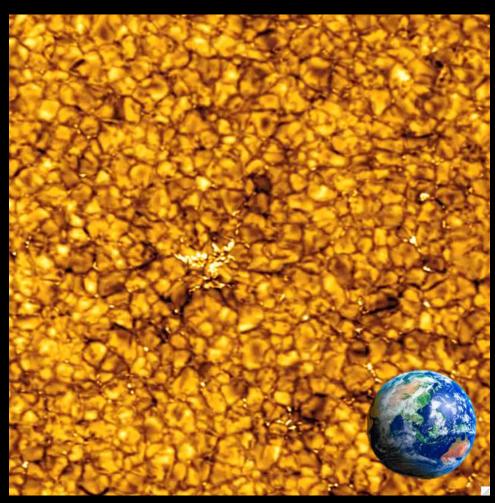


## Interno del Sole: zona convettiva



Nell'ultimo ¼ di raggio solare l'energia viene trasportata da enormi celle convettive che trasportano il plasma più caldo in superficie.

- → la parte terminale di questo moto è visibile sulla superifice del Sole, la fotosfera solare
- → la **granulazione** è l'emersione di «bolle» di plasma più caldo che si raffredda e torna verso l'interno del Sole



(video della durata di 1 ora)



## Il modello solare standard

Modello Solar standard (MSS): insieme di equazioni che descrivono l'equilibrio delle stelle (bilancio di pressione, conservazione della massa, dell'energia, evoluzione della composizione chimica, etc...)

#### Risultati principali del Modello Solare Standard:

- La luminosità solare L era inizialmente ~3/4 del valore attuale → se ciò avvenisse oggi
  comporterebbe degli sconvolgimenti climatici enormi (calotte polari su tutto il globo),
  ma non se ne hanno evidenze geologiche nel passato → fattori evolutivi composizione
  atmosfera terrestre (maggiore effetto serra).
- 2.  $T_C \sim 1.5 \times 10^7$  K,  $n_C \sim 10^{25}$  cm<sup>-3</sup> Pressione e densità decadono di un fattore 10 entro  $\sim 0.3$  R<sub>sun</sub> (mentre la T decade più lentamente, di un fattore 10 entro  $\sim 0.8$  R<sub>sun</sub> )  $\rightarrow$  entro 0.5 R<sub>sun</sub> è contenuto il 90% della massa solare
- 3. Entro 0.72 R<sub>sun</sub> prevale il trasporto radiativo dell'energia, più in alto prevale il trasporto convettivo.
- 4. il MSS permette di derivare delle conclusioni sull'evoluzione futura del Sole.



## Il problema dei neutrini solari

Complessivamente per ogni ciclo protone-protone si ha:

4  $^{1}\text{H}$   $\Rightarrow$   $^{4}\text{He}$  + 2  $_{\text{Y}}$  + 2  $_{\text{e}}$  + 26.73 MeV in energia cinetica delle particelle

quindi il numero totale  $N_{\nu}$  di  $v_{e}$  che ci aspettiamo siano prodotti al secondo all'interno del Sole per dare la luminosità osservata  $L_{sun}$  (erg/s) è dato da

$$N_{\nu} = \frac{2L_{sun}}{Q_{pp}} \rightarrow \Phi_{\nu} = \frac{N_{\nu}}{4\pi a^2} \approx 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

**Problema**: le misure del flusso di neutrini ottenute dalla fine degli anni '60 conclusero che il  $\Phi_v$  osservato era circa 1/3 di quanto atteso dal modello solare standard  $\rightarrow$  problema dei neutrini solari

**Soluzioni proposte:** modelli «alternativi» dell'interno del Sole, verifica sperimentale accurata delle misure del flusso  $\Phi_v$ , attribuzione della discrepanaza al fenomeno dell'oscillazione dei neutrini

**Soluzione:** misure dei tre tipi di neutrini esistenti  $(v_e, v_{\mu}, v_{\tau})$  confermarono l'esistenza delle **oscillazioni dei neutrini** e la correttezza del MSS.

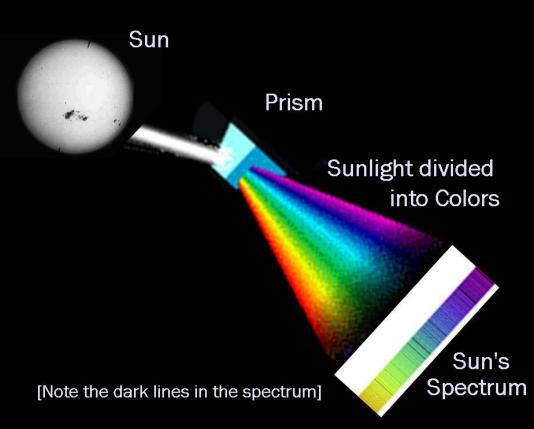


## L'esterno del Sole



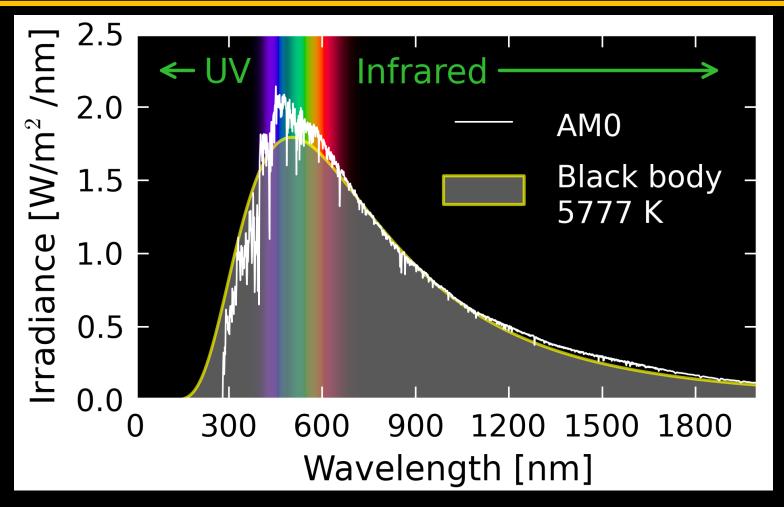
# Esterno del Sole: spettro solare







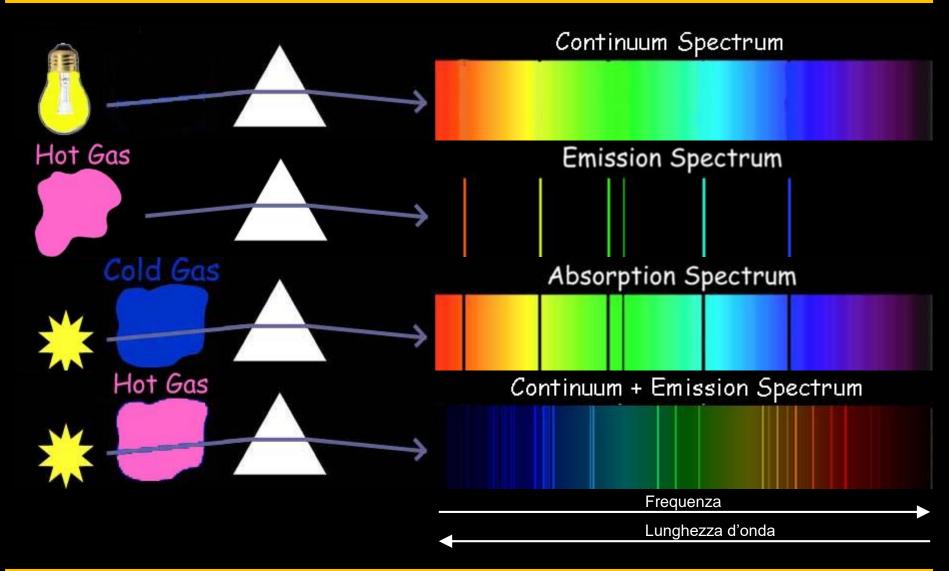
## Esterno del Sole: spettro solare



Spettro solare ben approssimato dall' **emissione di corpo nero** con T efficace di 5777 K; lo spettro presenta però molteplici righe scure → righe di Franhofer

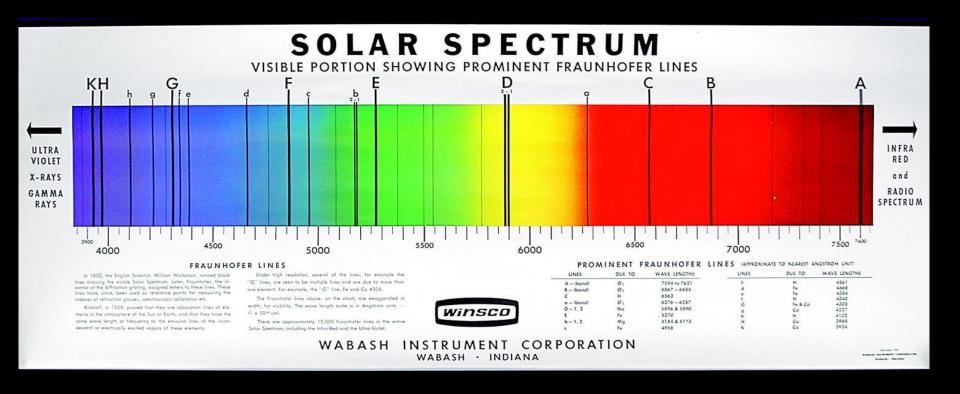


## Spettroscopia





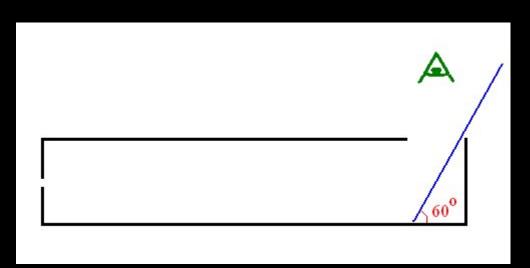
## Lo spettro visibile del Sole



Le righe di Franhofer sono righe dovute all'assorbimento della radiazione fotosferica da parte del plasma alla base della cromosfera più freddo (circa 4000 K).



## Lo spettro del Sole: attività

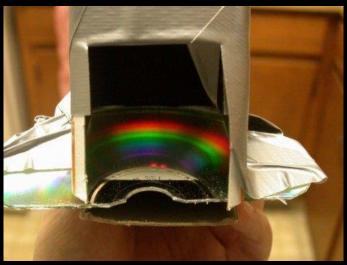


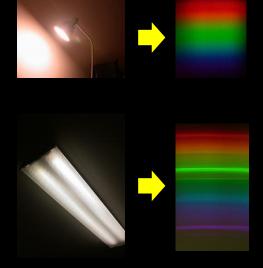
E' possibile costruire un spettroscopio molto semplice per osservare lo spettro solare continuo solcato dalle righe di assorbimento di Franhofer, utilizzando:

- una scatola di cartone
- un vecchio CD

Questo può essere poi utilizzato epr osservare anche gli spettri di lampade ad incandescenza, al neon, o altro...









### La Struttura esterna del Sole

#### **Fotosfera**

- Il sole visibile all'occhio umano
- T = 5.000 K

#### **Cromosfera**

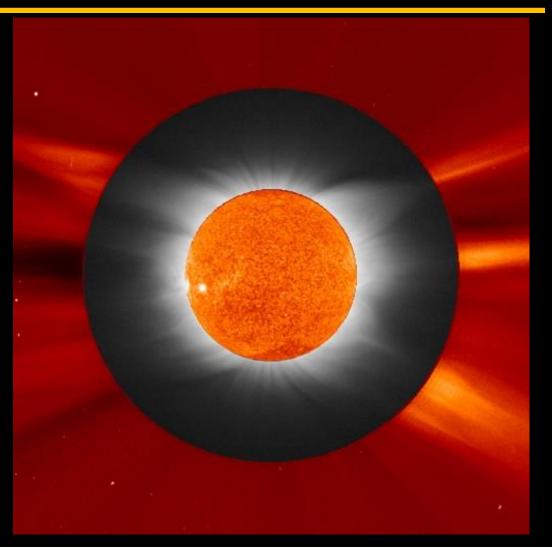
 $T = 50.000^{\circ}$ 

#### Regione di Transizione

T aumenta fino a 500.000 K

#### Corona

- L'atmosfera del Sole
- Visibile durante le eclissi oppure dallo spazio
- Vento solare
- T più di 1 Milione di gradi!

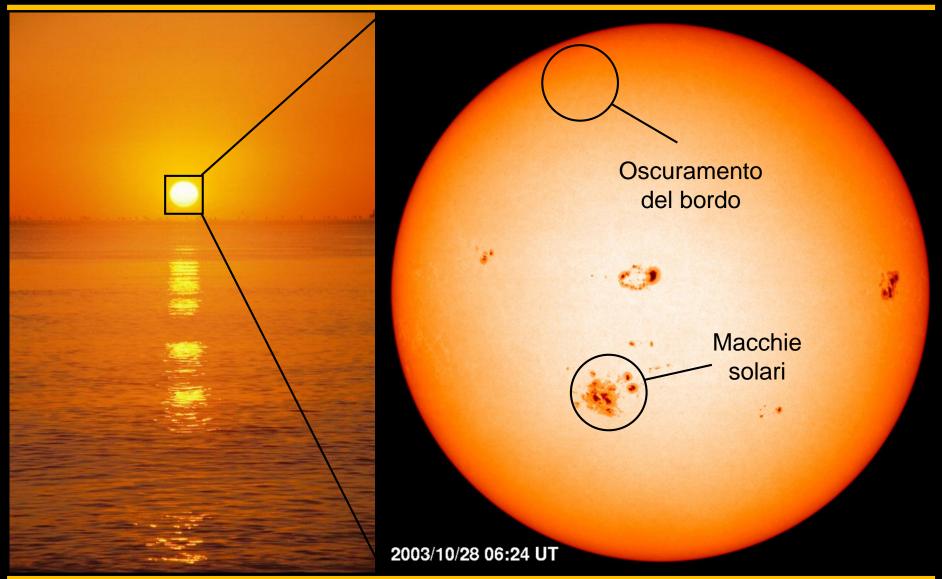


La temperatura sale da 5.000 K (fotosfera) 1.000.000 K (corona)





# Esterno del Sole: Fotosfera



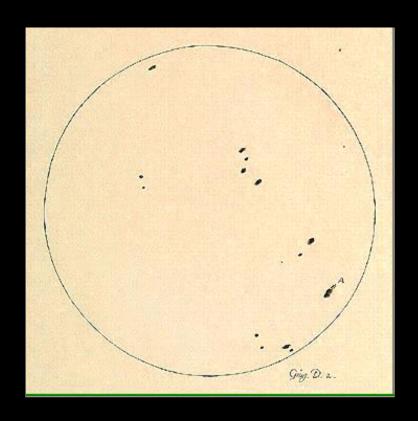




## Scoperta delle macchie solari

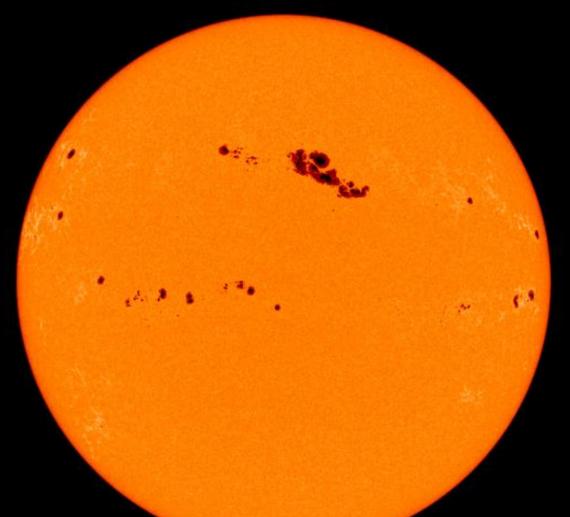
#### Conclusioni di Galileo

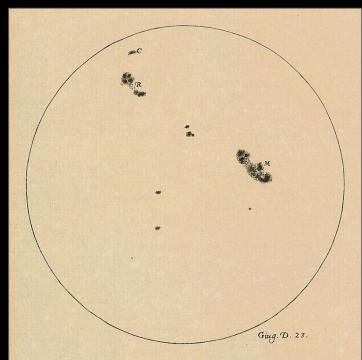
- Il Sole ruota con periodo di 27 giorni da Est a Ovest e le macchie solari sono trascinate nel moto di rotazione
- Appaiono in due zone a Nord e a Sud dell' equatore solare con latitudine massima di 28°-29°
- Sono fenomeni transitori, sono di forma irregolare e variabile, con vita media di 6 giorni
- Le macchie sono veramente fenomeni solari e non planetoidi o asteroidi.





## Scoperta delle macchie solari



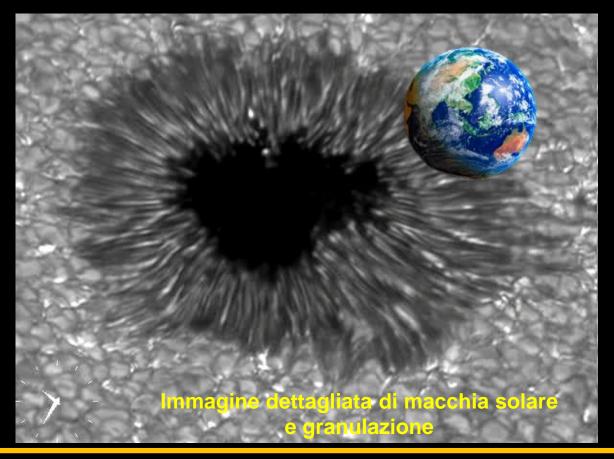


2001/03/29 09:36 UT



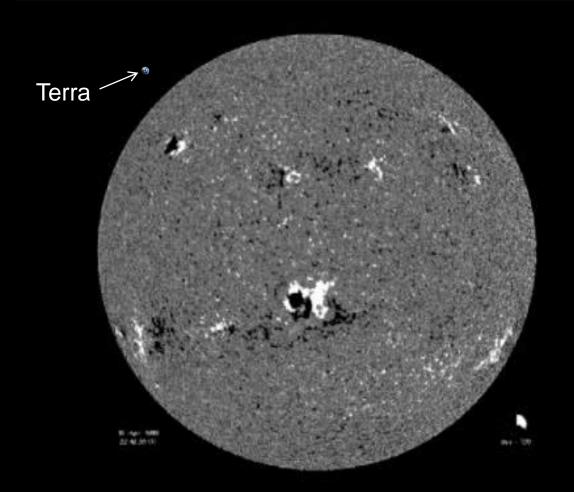
### Fotosfera: le macchie solari

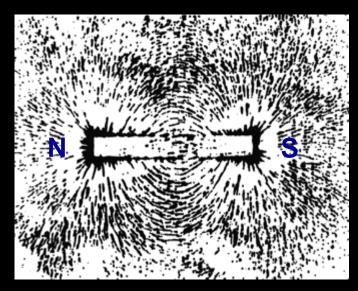
- Aree scure (2 zone: ombra e penombra)
- Intensi campi magnetici
  - Il trasporto di energia dall' interno del sole è inibito
  - Aree più fredde e quindi più scure





### Fotosfera: le macchie solari



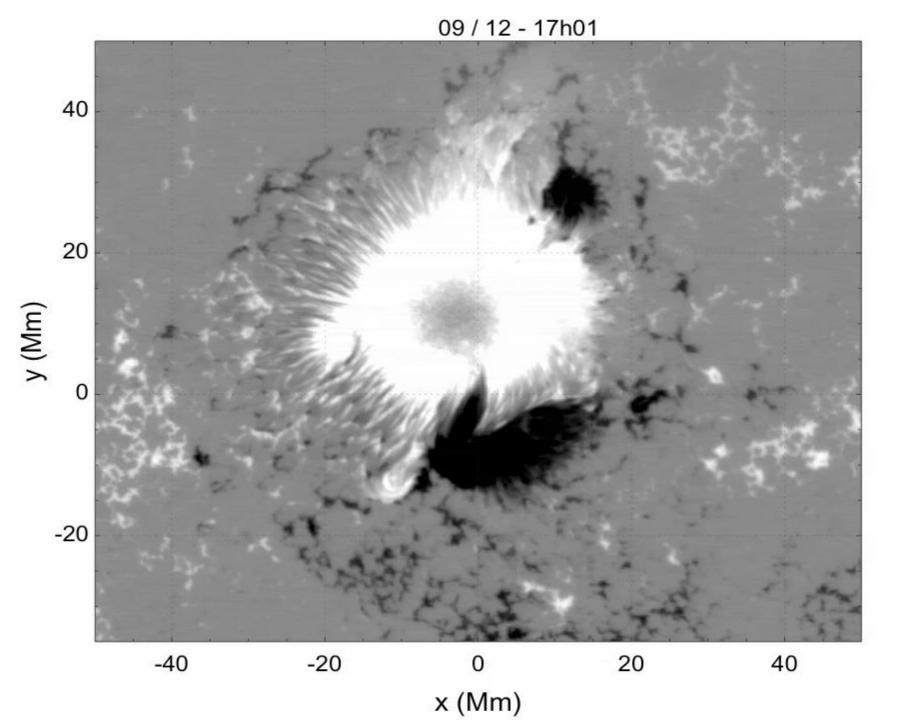


Qualunque magnete genera una configurazione caratteristica del campo magnetico detta "di dipolo", con due polarità opposte.

Magnetogramma del Sole: le aree chiare e quelle scure indicano la presenza di intensi campi magnetici di polarità opposta





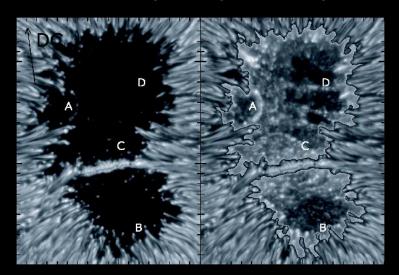


# Perché le macchie sono scure?

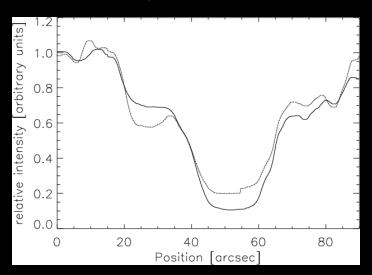
Le macchie solari appaiono "scure" per via del forte contrasto rispetto al sole quieto circostante. In particolare il rapporto I<sub>umbra</sub> / I<sub>QS</sub> può essere stimato usando la legge di radiazione di **corpo nero** 

$$I_{\lambda} = \frac{2hc^{2}}{\lambda^{5}} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_{B}T}\right) - 1 \right]^{-1} \rightarrow \frac{I_{\lambda}(T_{1})}{I_{\lambda}(T_{2})} = \frac{\left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_{B}T_{2}}\right) - 1 \right]}{\left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_{B}T_{1}}\right) - 1 \right]} \approx (0.13)_{\lambda = 5500A}$$

per  $T_1 = 4000$  K e  $T_2 = 5800$  K  $\rightarrow$  variazione circa del 90% nell'intensità a I = 5500 Å. Un conto analogo per grano/intergrano (contrasto ~ 0.88-0.90)  $\rightarrow$   $\Delta$ T ~ 150-200 K



Aumento di contrasto → umbral dots



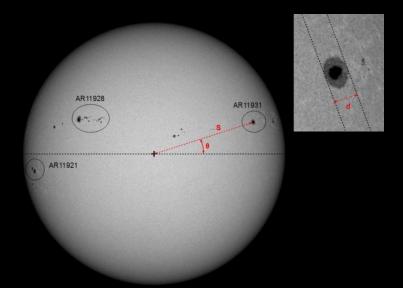
Intensità relativa lungo una macchia

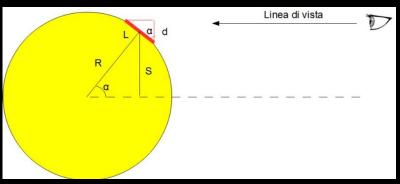


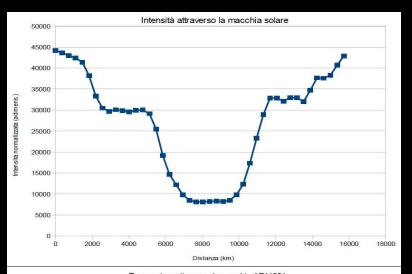


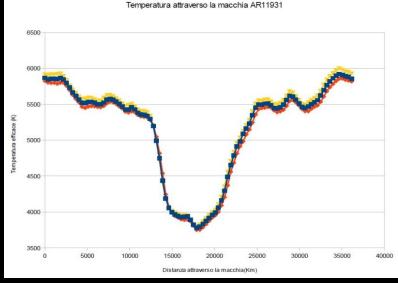
### Macchie solari: attività

Misurare la temperatura di una macchia solare con la legge di corpo nero





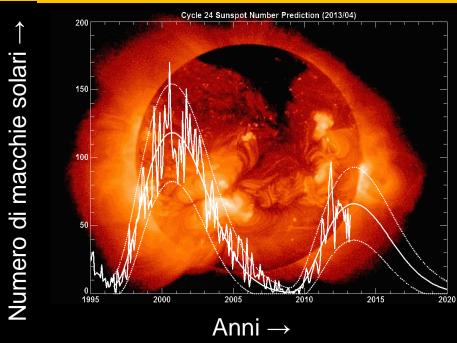






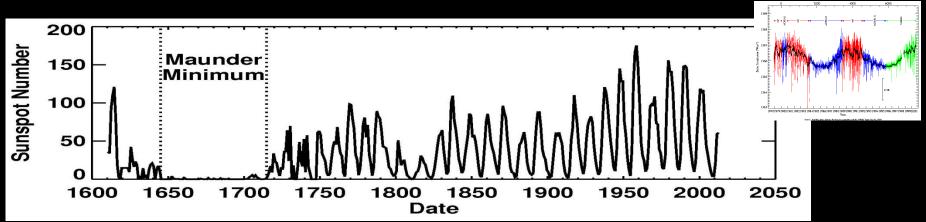


### Il Ciclo di Attività Solare





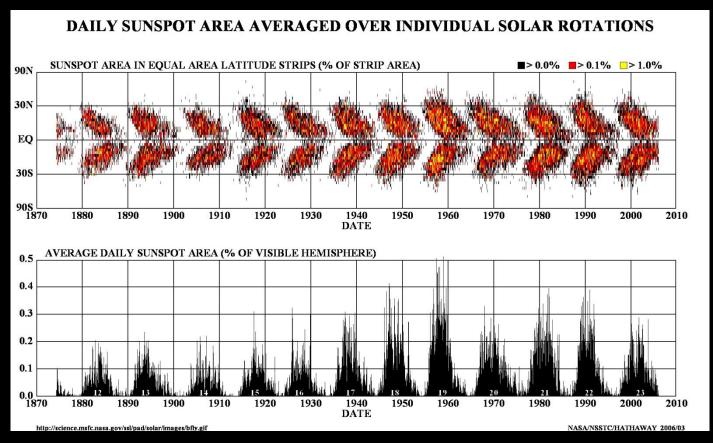
(Congelamento del Tamigi – 1677)







## Proprietà delle macchie solari

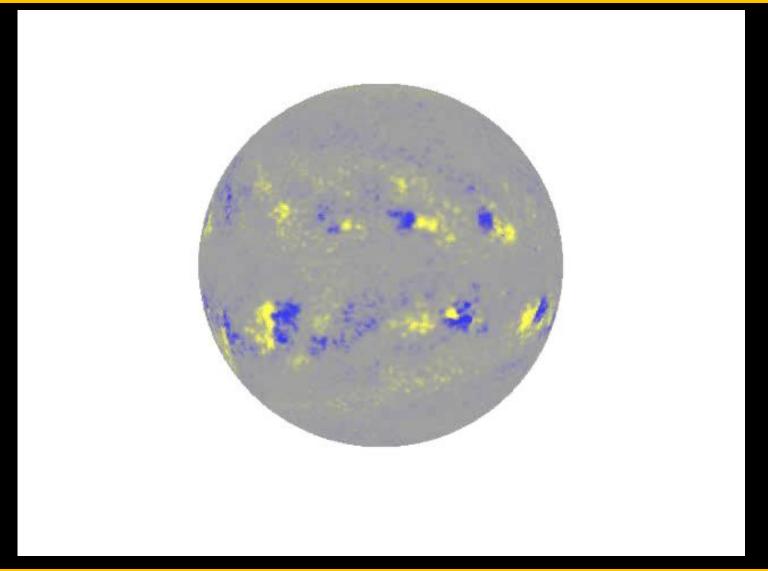


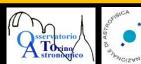
- Periodicità nel numero di macchie (11.5±2.4) anni, possibili periodicità secolari
- Butterfly Diagram: nel corso del ciclo le macchie si spostano da 30-45 deg all'inizio del ciclo fino a ~15deg in latitudine alla fine del ciclo (legge di sporer)
- International Sunspot Number: R = k (10 g + s) con s=numero di spot, g numero di gruppi, k fattore di correzione (k<1) legato all'osservatore.



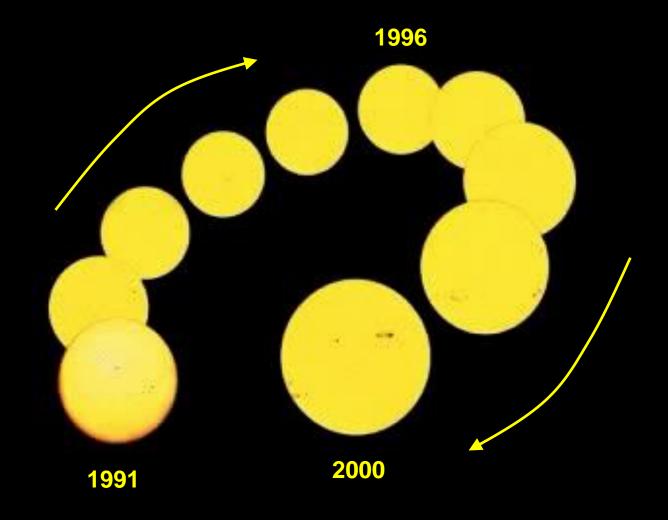


# Proprietà delle macchie solari





## Attività Solare 1991-2000





# Il Campo Magnetico del Sole



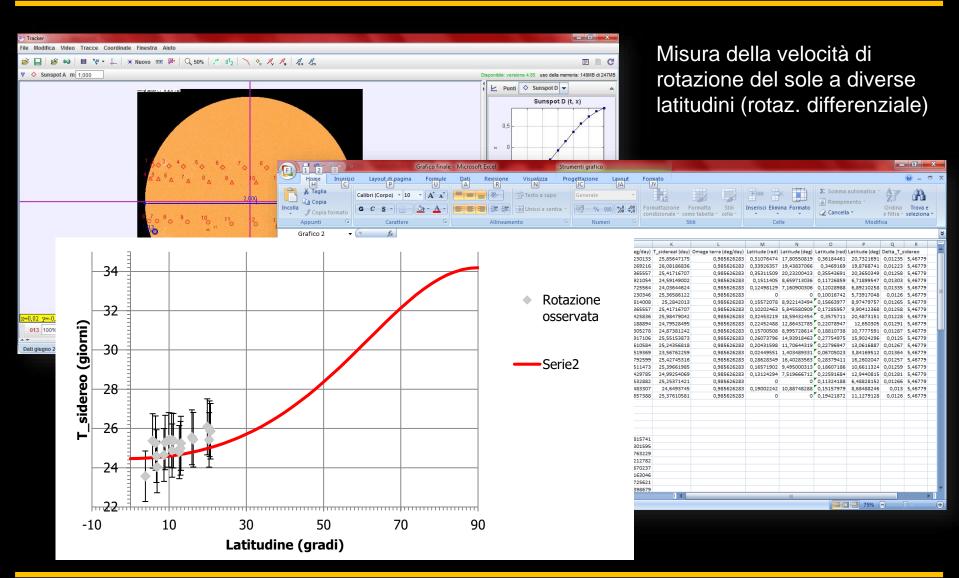
La velocità di rotazione all'equatore è maggiore rispetto ai poli ("rotazione differenziale").



A causa della rotazione differenziale il campo magnetico viene "deformato e frammentato".



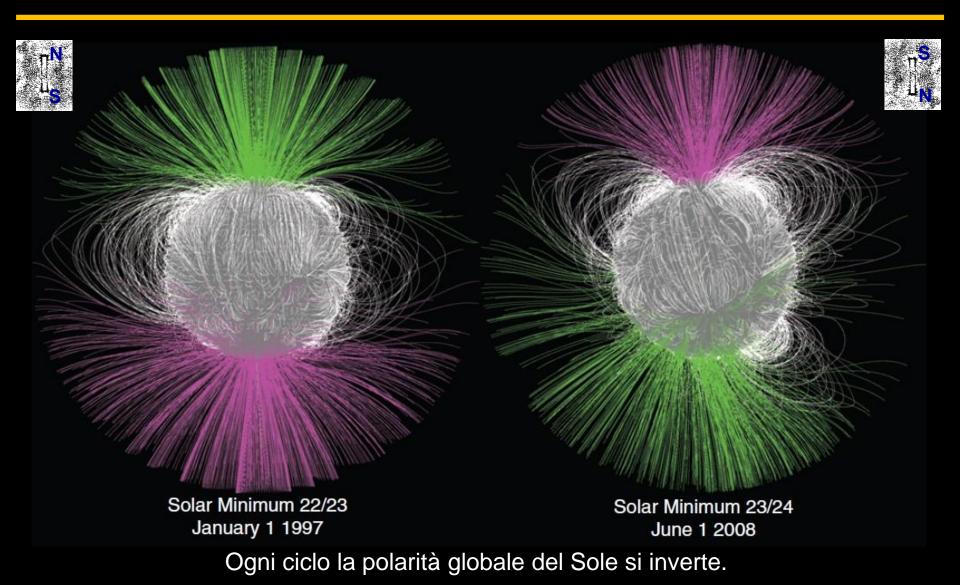
## Rotazione solare: attività







# Il Campo Magnetico del Sole

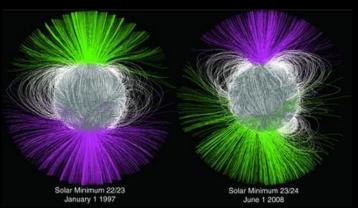


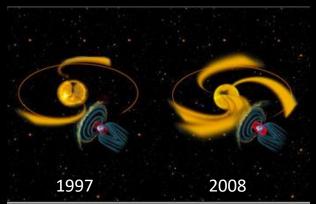




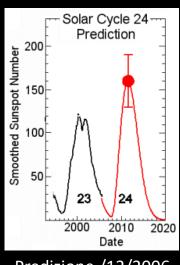
### Comportamenti inattesi del Sole

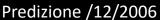
1. Lo strano minimo al termine del ciclo 23: la fine del ciclo e l'assenza di macchie durò un anno di più del previsto (a luglio 2008 si parlava di possibile nuovo minimo di Maunder),

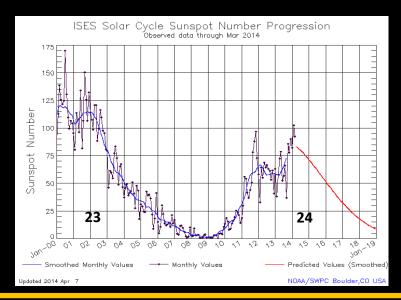




il campo risultò molto più asimmetrico, si osservarono buchi coronali equatoriali con streams di vento veloce anche a basse latitudini.







2. Le previsioni errate sul picco del ciclo 24: i modelli predirono un picco più intenso della media per fine dicembre 2012 (!) e non fu previsto il doppio picco. Il ciclo 24 è il più debole dal picco del 1906 (ciclo 14).





### La Struttura esterna del Sole

#### **Fotosfera**

- Il sole visibile all'occhio umano
- T = 5.000 K

#### Cromosfera

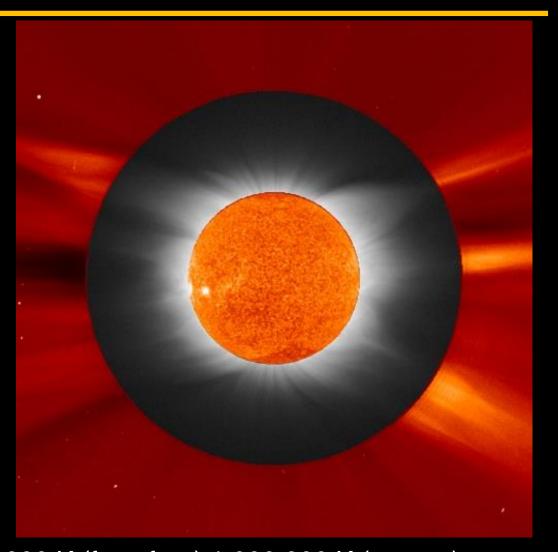
 $T = 50.000^{\circ}$ 

#### Regione di Transizione

T aumenta fino a 500.000 K

#### Corona

- L'atmosfera del Sole
- Visibile durante le eclissi oppure dallo spazio
- Vento solare
- T più di 1 Milione di gradi!

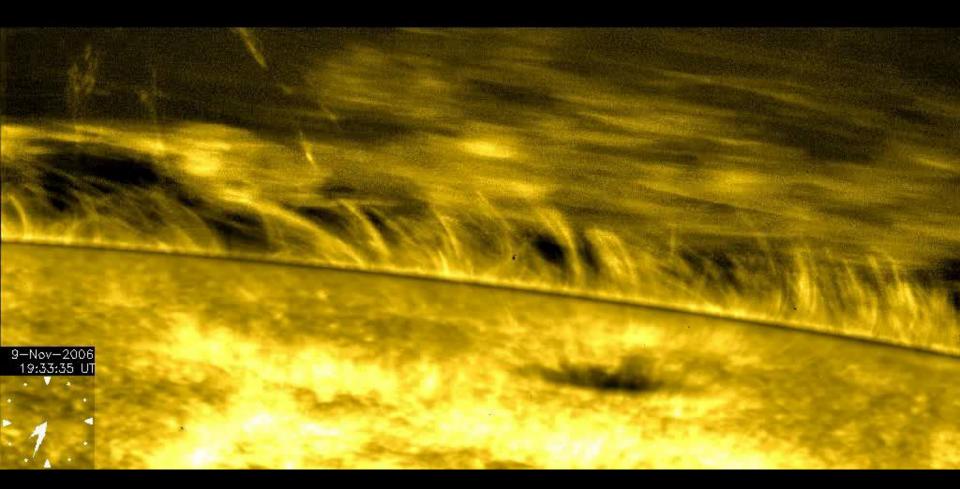


La temperatura sale da 5.000 K (fotosfera) 1.000.000 K (corona)



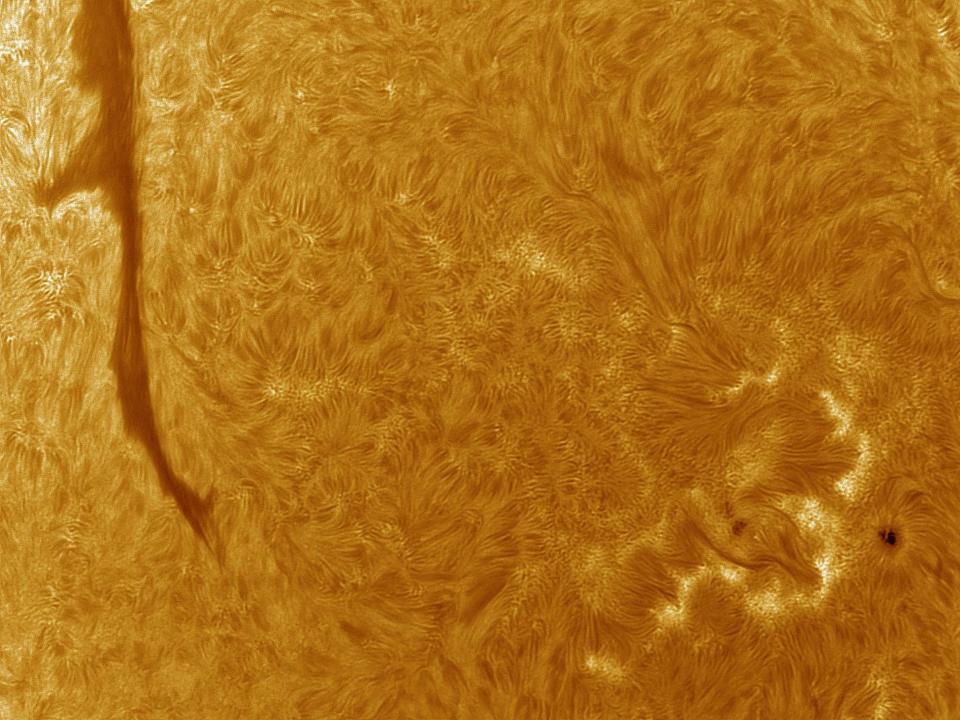


### La Cromosfera

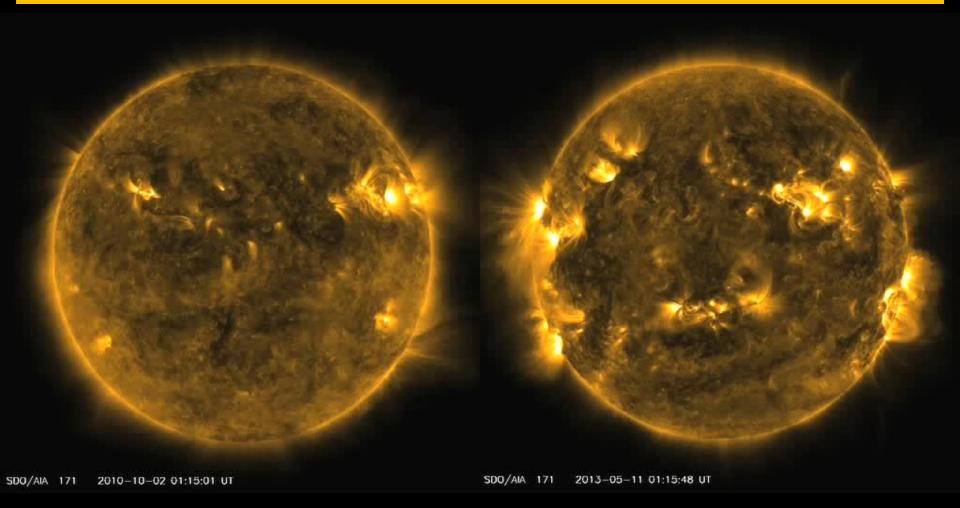


(JAXA-Hinode SOT telescope)



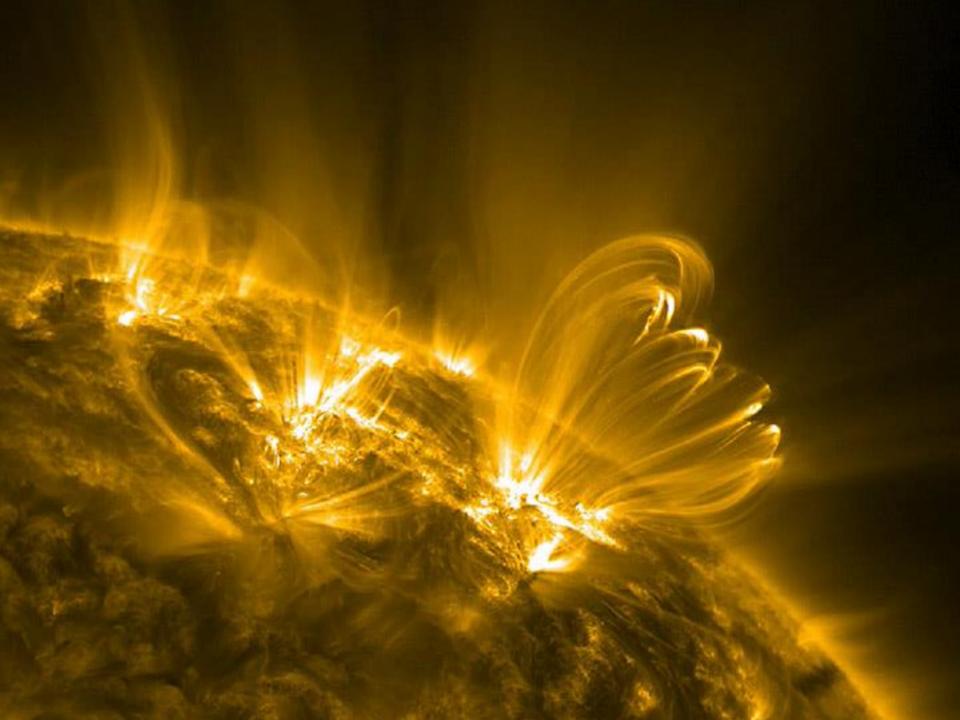


#### La bassa Corona

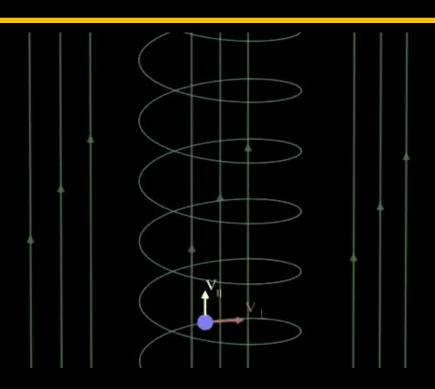


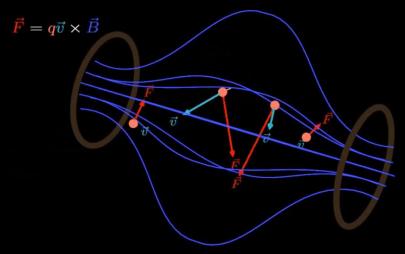
Filmati nell'EUV (17.1 nm) → plasmi a 1.5 milioni di gradi. Questa regione del Sole può essere osservata **solo dallo spazio** (NASA-SDO AIA telescope)





## Moto in una "bottiglia magnetica"

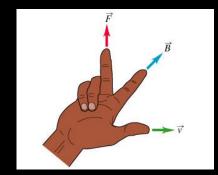




Moto di una carica immersa in un campo magnetico **non uniforme** (bottiglia magnetica)

Moto di una carica immersa in un campo magnetico uniforme

Una particella carica di carica q, con velocità v ed immersa in un campo magnetico B è soggetta ad una forza detta Forza di Lorentz FL data da  $F_L = q \ v \times B$ 

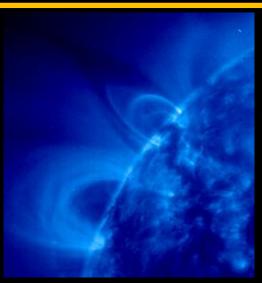


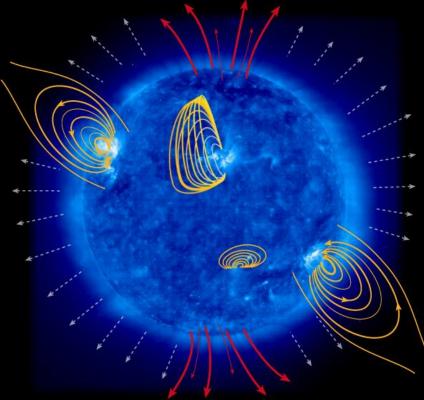


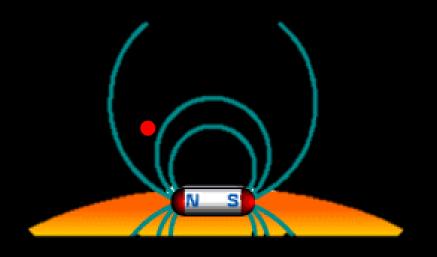
## Il Campo Magnetico della Corona

Osservando nell'UV si notano molte arcate che si espandono sopra la fotosfera. La regione qui visibile è chiamata corona solare:

si parla quindi di arcate coronali



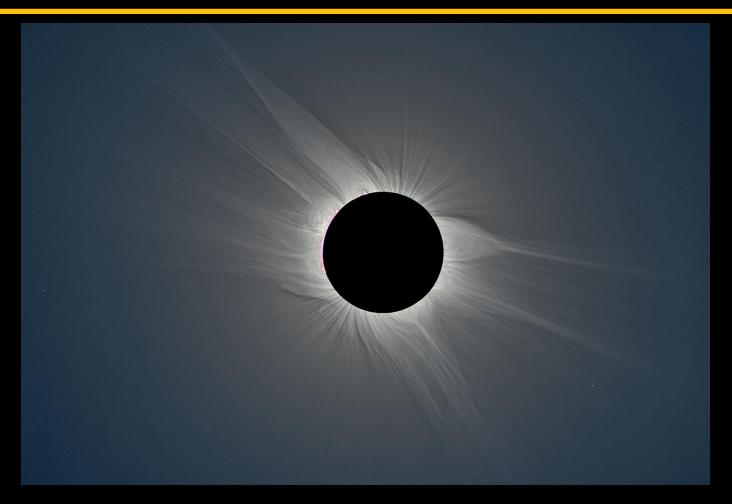




Le particelle cariche (gas ionizzati) restano intrappolate all'interno della regione di campo magnetico dipolare ed emettono radiazione nell'UV; si rende visibile **un'arcata coronale**.



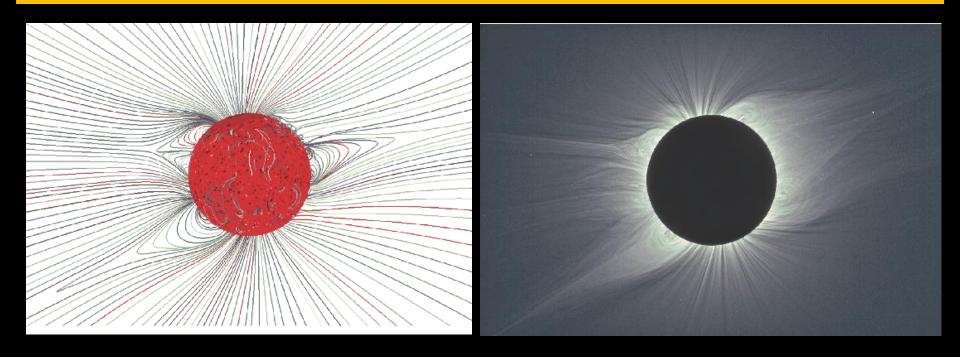
### La Corona intermedia



Le eclissi totali mostrano un'atmosfera molto più estesa di quanto ci si potrebbe attendere se in equilibrio idrostatico → evidenza di **un'espansione verso l'esterno**.



### Il Campo Magnetico della Corona intermedia



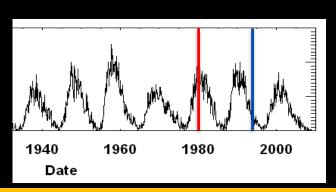
- Zone di **campo chiuso** → associate agli streamers coronali, più brillanti in luce visibile, associati alla propagazione del vento solare lento
- Zone di **campo aperto** → associate alle piume coronali, meno brillanti nel visibile, associate alla propagazione del vento solare veloce
- Notare come l'orientazione delle strutture tracci le linee di campo ( $\beta << 1$ )



### Variabilità della Corona col ciclo



Eclissi totale del 1994



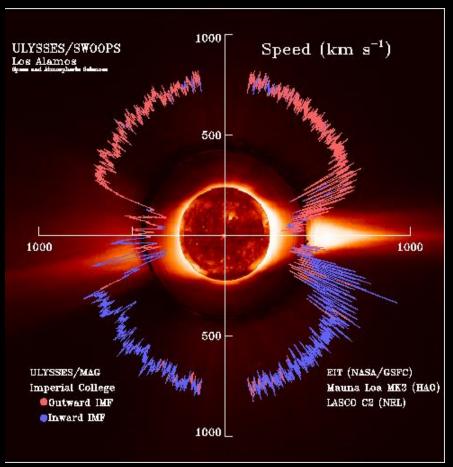
Eclissi totale del 1980

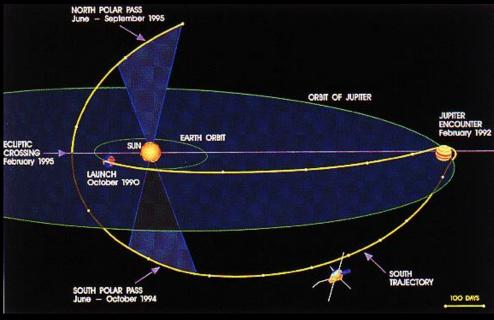
- Minimo del ciclo: streamers lungo la fascia equatoriale, buchi coronali alle alte latitudini
- Massimo del ciclo: distribuzione omogenea di streamers e riduzione dei buchi coronali





## **Il Vento Solare**





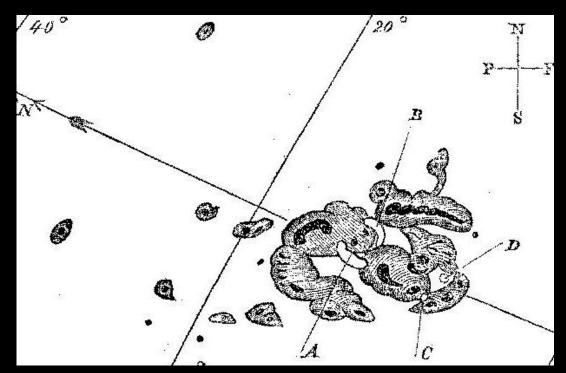


#### **Brillamenti solari**

Energia rilasciata: ~ 10<sup>25</sup> Joules in ~ 10 minuti (~ 100 miliardi di bombe di Hiroshima)



## L'evento di Carrington



Disegno di Carrington del gruppo di macchie del 01/09/1859

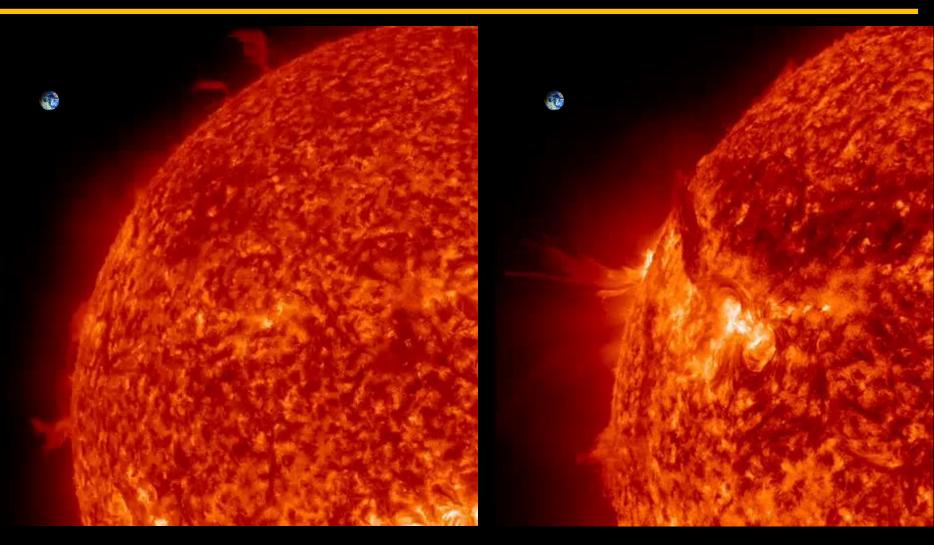
Il primo Settembre 1859
l'astronomo Richard Carrington
era impegnato nella sua
quotidiana osservazione delle
macchie solari quando osservò
un improvviso aumento di
luminosità nelle macchie al
centro del disco solare, mai
osservato prima → brillamento solare più intenso degli
ultimi 150 anni

→ A partire da 17 ore dopo brillanti aurore furono osservate fino a basse latitudini geomagnetiche (~20°) ed il servizio telegrafico fu interrotto per giorni → primo evento di meteorologia spaziale. Quali ripercussioni avrebbe oggi sulle nostre tecnologie un evento del genere?





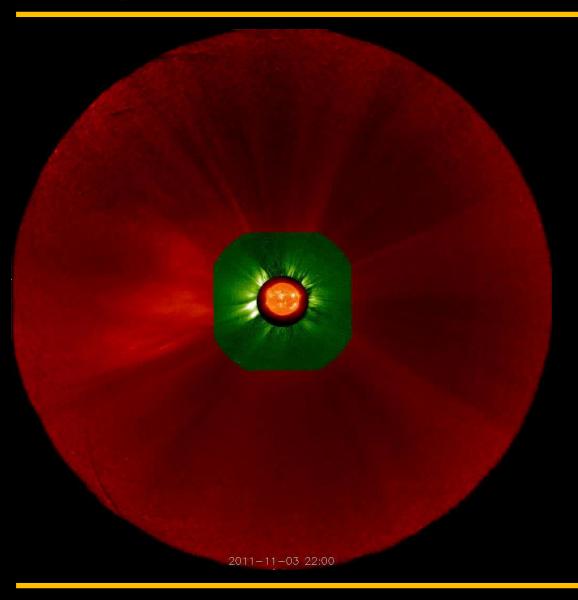
# Protuberanze quiescenti ed eruttive



Filmati nell'EUV (30.4 nm) → plasma a 50.000 gradi

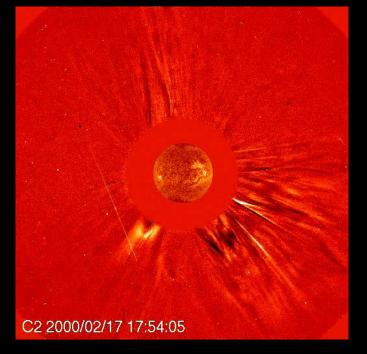


# Espulsioni Coronali di Massa (CME)



Un CME può espellere fino a 10<sup>13</sup> kg di plasma (10 miliardi di tonnellate) a 1000-2000 km/s.

I CME hanno una frequenza di circa uno alla settimana (fase di minimo) a più di uno al giorno (fase di massimo)





## Proprietà delle eruzioni solari

Coronagraph	Epoch year	FOV R⊙	Total # CMEs	Width Deg	Speed mean km s <sup>-1</sup>	Speed median km s <sup>-1</sup>	Mass 10 <sup>15</sup> g
OSO-7	1971	2.5–10	27	_	_	_	_
Skylab	1973–1974	1.5–6	115	42	470	_	6.2
Solwind	1979–1981, 1984–1985	3–10	1457	39	409	313	4.1
SMM C/P	1980, 1984–1989	1.6–6	1209	47	349	285	3.3
MLSO Mk3	1989–1996	1.1-2.4	274	36	390	305	_
LASCO	1996–2018	2.2-30	39188	41	360	300	1.2
SECCHI	2007–2014	2.5–15	1747	62	390	_	_

(Lamy et al. 2019)

Grazie alle osservazioni dallo spazio è stato possibile misurare le proprietà delle eruzioni solari in modo statistico basandosi su un campione molto ampio. Risultati principali:

Massa media dell'ordine di  $1-6 \cdot 10^{15}$  g, velocità media dell'ordine di 350-470 km/s.

Come si confronta questa velocità media con la velocità di fuga dal Sole?



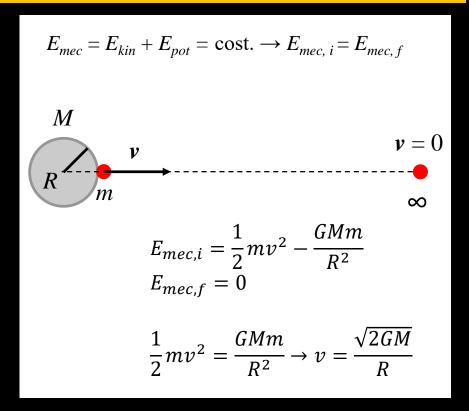


## La velocità di fuga dal Sole



Sapendo che  $R_{sun}$  ~ 700000 km e che  $M_{sun}$  ~  $2 \cdot 10^{30}$  kg  $\rightarrow$   $V_{esc}$  ~ 615 km/s che è maggiore della velocità media delle eruzioni solari.

Per la Terra la stessa velocità è 11.2 km/s.



Questo vuol dire che le eruzioni solari non sono dei corpi che vengono sparati dal Sole come una palla di cannone quindi senza propulsione solo con una velocità iniziale, ma hanno invece una loro «propulsione» così come un razzo che deve lasciare l'orbita terrestre.

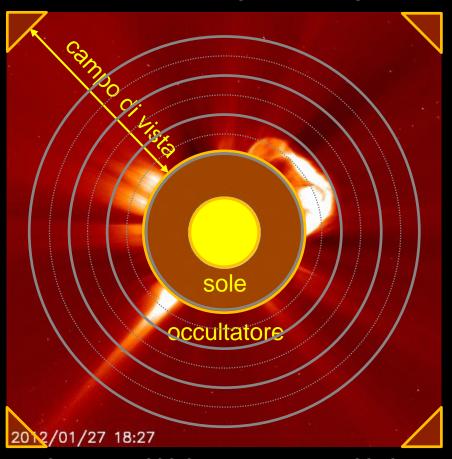
Nel caso delle eruzioni solari la propulsione è magnetica, cioè è data dalla Forza di Lorentz che accelera il plasma.





#### Velocità delle CME: attività

Stima della velocità ed accelerazione delle eruzioni solari → dall'analisi delle immagini coronografiche.



$h(R_{sun})$	t (UT)
3.0	18:27 = 18.45
4.5	18:38 = 18.63
6.0	18:48 = 18.80

Le distanze sono misurate in raggi solari (1 R<sub>sun</sub> ~ 700000 km)

I tempi sono dati in tempo universale (UT), conviene misurarli in frazioni di ore

Strumento LASCO-C2 a bordo della sonda SOHO SOHO movie theater: https://soho.nascom.nasa.gov/data/Theater/



## Velocità delle CME: attività

$$v = v_0 + a(t - t_0)$$
  

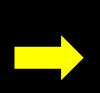
$$h = h_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

Assumiamo:  $h_0 = 1 R_{sun}$ ;  $v_0 = 0$  quindi la legge del moto è

 $h(R_{sun})$ 

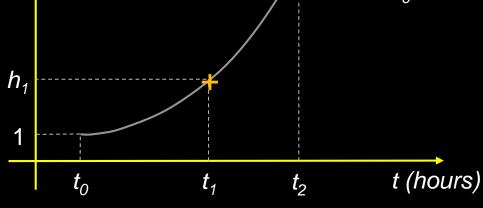
$$h = 1 + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

Evoluzione iniziale: può essere approssimata con un moto uniformemente accelerato di un corpo che parte da fermo.



$$\begin{cases} h_1 = 1 + \frac{1}{2}a(t_1 - t_0)^2 \\ h_2 = 1 + \frac{1}{2}a(t_2 - t_0)^2 \end{cases}$$

Sistema di 2 equazioni in 2 incognite: a e  $t_0 \rightarrow$  si risolve per trovare le 2 incognite







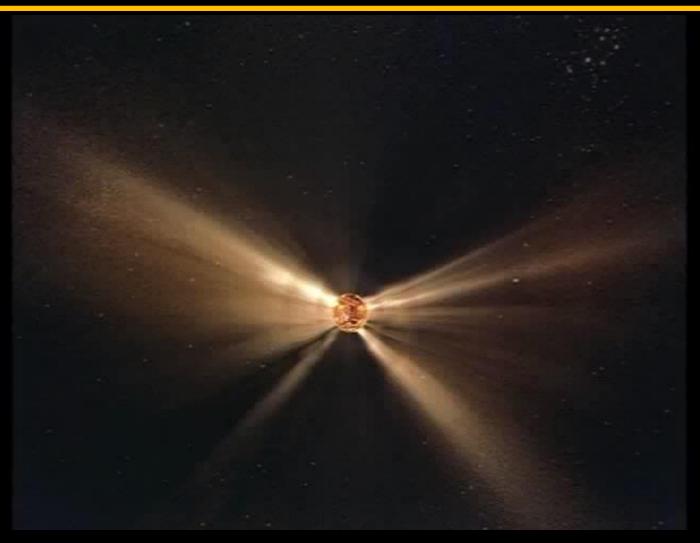
#### Verifica dei risultati

	SOHO LASCO CME CATALOG																
YEAR						МО	NTH										
1996	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	May	<u>Jun</u>	<u>Jul</u>	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec					
1997	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec					
1998	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	First Appear			Angular Width	Linear Speed	2nd-order Speed at	2nd-order Speed at 20	O Accel	Mass [gram]	Kinetic Energy	MPA [deg]		Remarks
1999	Jan	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	Date Tim		[deg]	[deg]	[km/s]	final height [km/s]	Rs [km/s]			[erg]	MPA [deg]		
2000	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/01	01:25:49	40	23	801	<u>701</u>	606	-18.7* <sup>1</sup>	4.3e+14	1.4e+30	43	C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	
2001	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/01	04:12:07	266	33	<u>247</u>	<u>265</u>	372	3.6*1	1.2e+13	3.5e+27	268	C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	Poor Event
2002	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/01	06:24:05	47	13	96	106	303	3.5*1			50	C2 C3 195 PHTX DST	Very Poor Event; Only C2
2003	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/01	08:00:05	272	47	228	199	0	-4.9*1		7.0e+28	2.72	Java Movie C2 C3 195 PHTX DST	
2004	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/01	12:36:06	351	42								Java Movie C2 C3 195 PHTX DST	Only C2
2005	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>					237	293	614	14.1*1				Java Movie C2 C3 195 PHTX DST	
2006	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/01	13:36:25	297	215	639	749	755	12.0	5.1e+15*2	1.0e+31*2	293	Java Movie	Partial Halo
2007	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/01	23:48:07	134	9	252	303	<u>493</u>	8.5*1			135	Java Movie	Very Poor Event
2008	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/02	01:48:05	246	296	<u>531</u>	<u>485</u>	<u>488</u>	-3.7	5.3e+15*2	7.5e+30*2	249	C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	Partial Halo
2009	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/02	09:48:05	275	63	<u>547</u>	532	500	-2.8*1	5.1e+14	7.6e+29	274	C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	
2010	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/02	15:12:40	Halo	360	1138	1080	1109	-8.4	8.4e+15*2	5.4e+31*2	244	CO CO 105 DUTY DOT	
2011	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/02	17:48:05	257	26	536	604	601	6.0*1			246	C2 C3 195 PHTX DST	Poor Event
2012	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	_	20:57:28	264	17	533	601	591	5.5*1			256	Java Movie C2 C3 195 PHTX DST	
2013	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	_											Java Movie C2 C3 195 PHTX DST	
2014	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/03	01:25:52	283	21	437	417	265	-5.8* <sup>1</sup>	1.5e+14	1.4e+29		Java Movie	Very Poor Event
2015	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/03	02:24:05	251	29	<u>670</u>	<u>687</u>	711	3.3*1	2.0e+14	4.6e+29		C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	
2016	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/03	04:36:05	273	21	<u>587</u>	<u>685</u>	<u>688</u>	9.8*1	9.9e+13	1.7e+29	272	C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	Poor Event
2017	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/03	06:48:07	60	66	<u>171</u>	276	305	3.7*1	2.7e+15	4.0e+29	61	C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	Poor Event
2018	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/03	09:36:05	33	35	446	483	513	4.0*1	1.4e+15	1.4e+30	28	C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	
2019	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar	<u>Apr</u>	2012/01/03	20:49:58	259	16	300	351	659	17.9*1			258	C2 C3 195 PHTX DST	Very Poor Event; Only C3
2020	<u>Jan</u>	<u>Feb</u>	Mar		2012/01/03	21-23-48	285	15	311	404	652	20.3*1			283	<u>Java Movie</u>   <u>C2 C3 195 PHTX DST</u>	Very Poor Event; Only C3
ofo poo	a a v			4/		23:25:11	286	25	304	205	0	-26.1* <sup>1</sup>		7.6e+28		Java Movie C2 C3 195 PHTX DST Java Movie	Poor Event
sfc.nasa.	gov/	CIVII	=_!!\$	ot/	2012/01/04	01:36:42	182	121	191	139	0	-12.8*1	4 0c+14*2	7 4c+28*2	193		Poor Event: Only C2: Partial Halo



https://cdaw

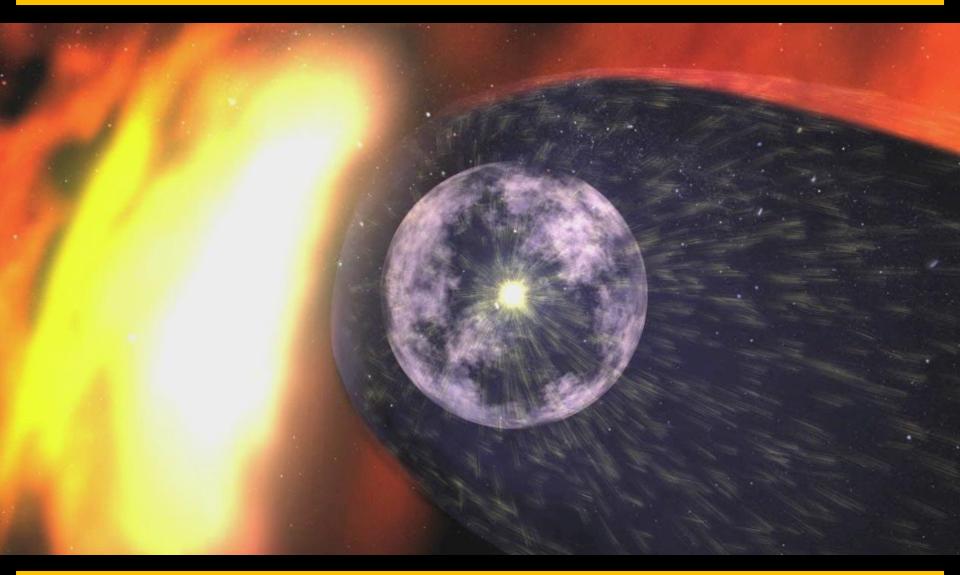
## Dal Sole all'Eliosfera



Filmati nella luce visibile (500 nm)



# Dal Sole all'Eliosfera





#### **Sommario**

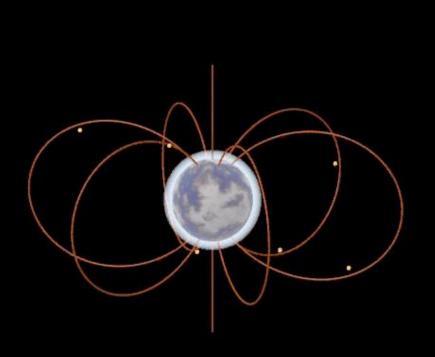
- Perché studiare il Sole?
- Cosa conosciamo del Sole?
  - L'interno del Sole: produzione e trasporto dell'energia
  - L'esterno del Sole: struttura ed attività dell'atmosfera
- Effetti dell'attività solare sulla Terra
  - Magnetosfera terrestre e Aurore
  - Tempeste Geomagnetiche
  - Sole e climatologia terrestre

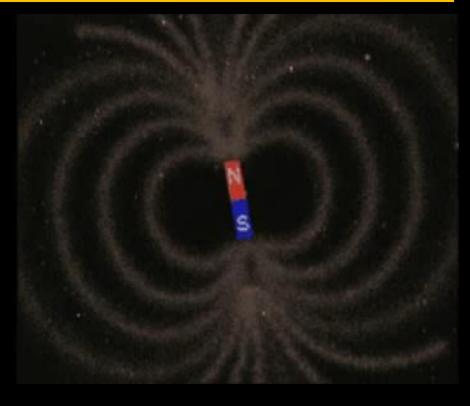


# Effetti dell'attività solare sulla Terra



#### La Magnetosfera terrestre





Moto di particelle cariche intrappolate dal campo magnetico terrestre nelle fasce di VanHallen (bottiglia magnetica)

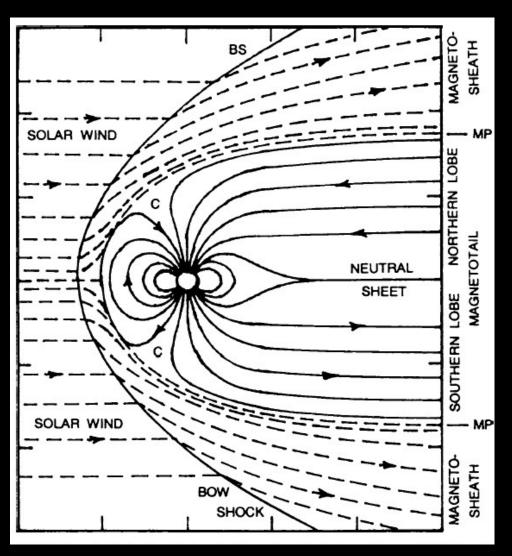
Il tempo di «rimbalzo» tipico (e- da 100 keV) è 0.1 s, quello di orbita attorno alla Terra 1000 s.

Il flusso del vento solare emesso dal Sole modifica la struttura dipolare della magnetosfera terrestre

La magnetosfera agisce da schermo per le particelle del vento solare



#### La Magnetosfera terrestre



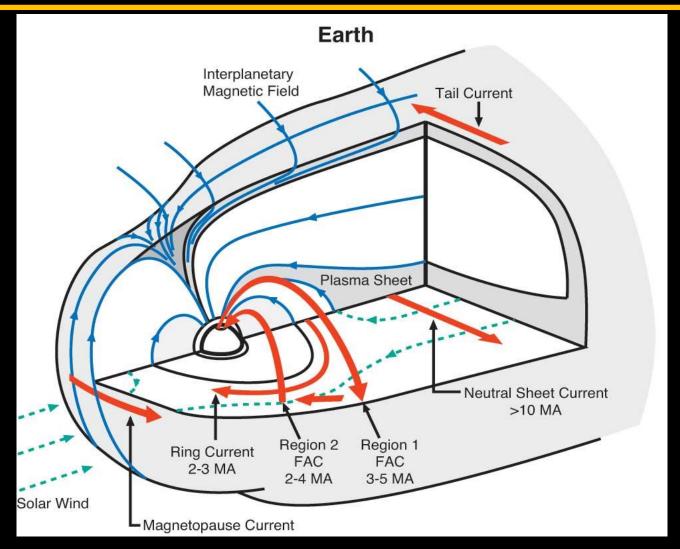
Formazione «magnetosfera» → ingredienti:

- i) vento solare  $(\rho_{SW}, v_{SW})$ ,
- ii) campo planetario ( $\mu = B_p R_p^3$  se dipolo)
- Magnetopausa (magnetopause): superficie di discontinuità del campo, dentro domina campo planetario, fuori il campo interplanetario.
- La Magnetosfera è ostacolo al flusso del vento solare
- → formazione di un **\*bow- shock** dove il vento è rallentato (da supera sub-sonico, alfvénico), riscaldato e
  compresso
- → deflessione del flusso del vento solare lungo la «magnetosheat»





#### La Magnetosfera terrestre

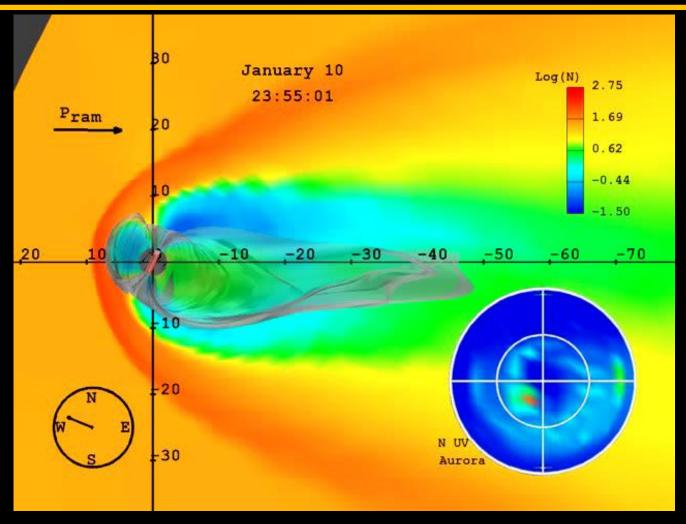


Permeata da molti sistemi di correnti tra cui le CORRENTI AD ANELLO che scorrono da Est verso Ovest





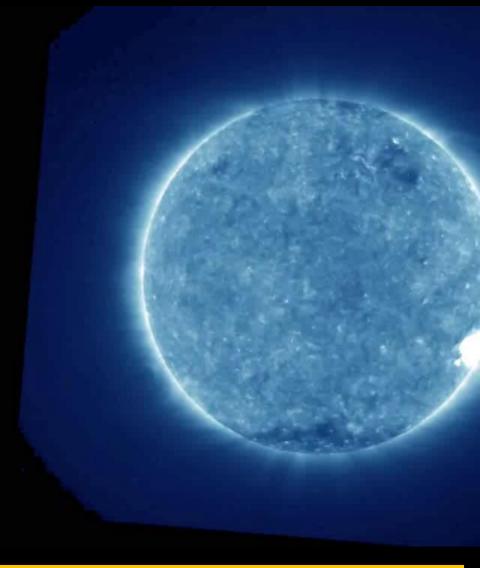
# Dinamica della Magnetosfera



Simulazione numerica che illustra le variazioni della magnetopausa all'aumentare della pressione dinamica del vento solare all'arrivo di un'eruzione solare

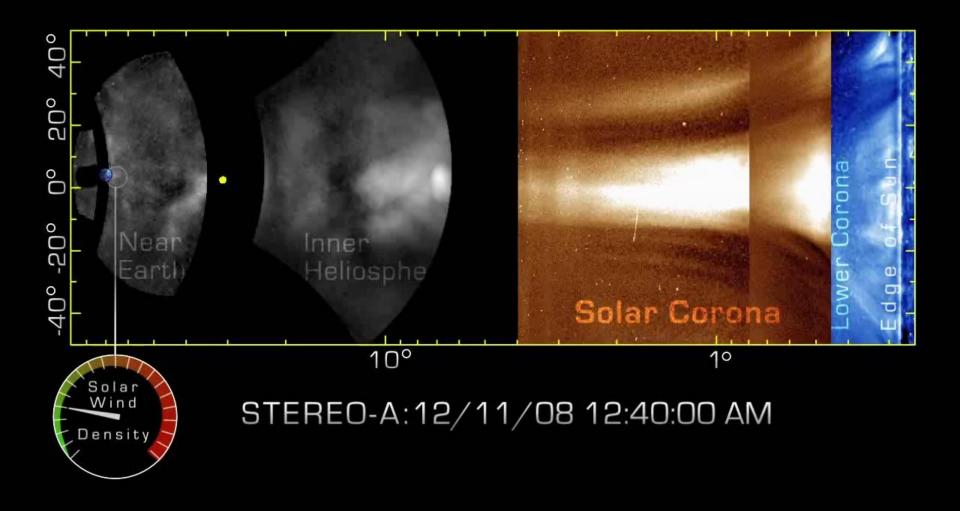


#### **Dal Sole alla Terra**



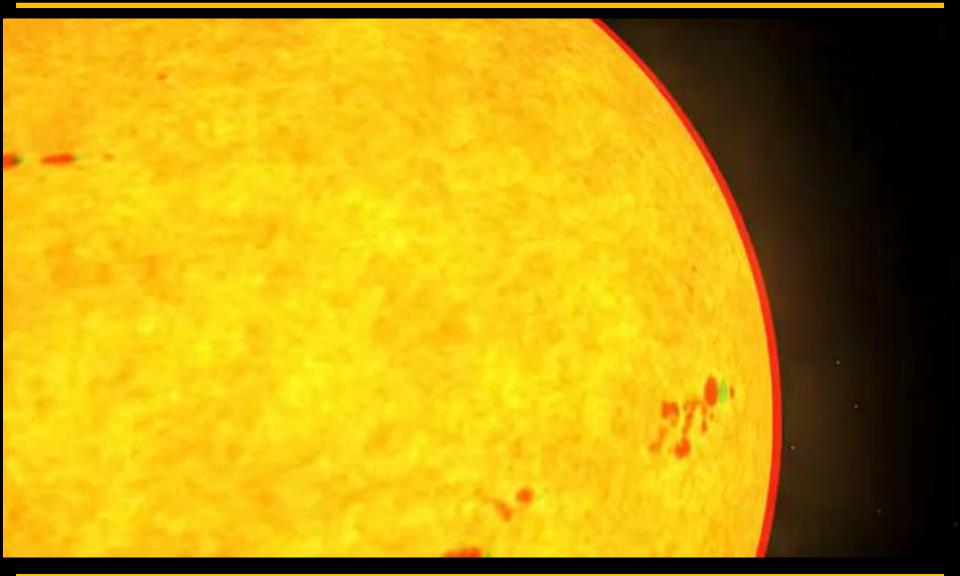


#### Dal Sole alla Terra





# Dal Sole alla Terra





#### Effetti sulla Terra: aurore



Aurore a corona



Aurore a spirale



Raggi aurorali dallo spazio



Aurore a cortina



Aurore distaccate e diffuse



Raggi aurorali da Terra





#### **Aurore dallo Spazio**

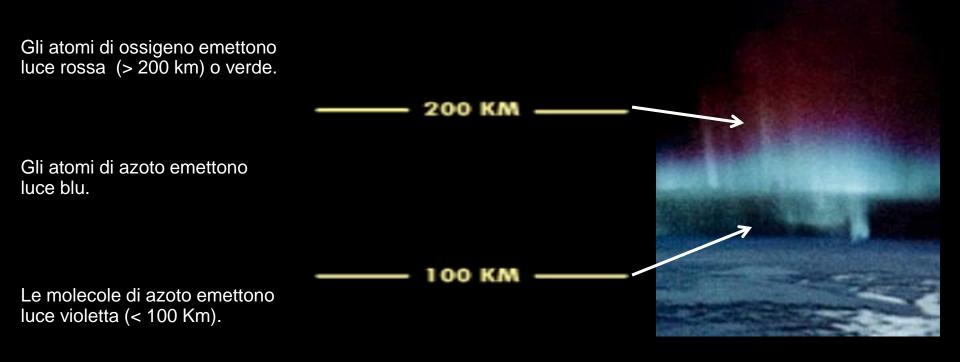


Ripresa video dalla ISS (orbita 330-435 km) di aurore: parte della luminosità è dovuta all' **airglow**, luminescenza naturale del cielo notturno dovuta a processi vari (ricombinazione ioni fotoionizzati di giorno, eccitazione da raggi cosmici, chemiluminescenza per reazioni chimiche tra O e N con molecole OH, etc...) visibile alla fine del video.



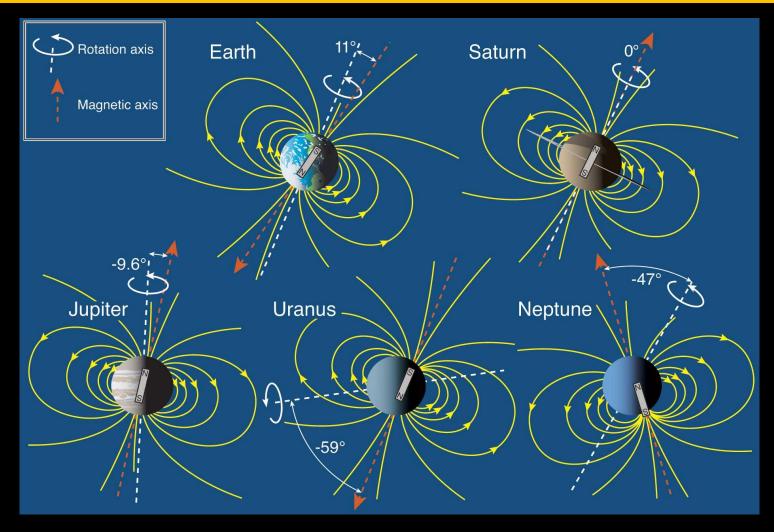
#### I colori delle Aurore

Gli elettroni provenienti dal Sole vengono imprigionati dal campo magnetico terrestre ed entrano così nell'atmosfera. Le loro collisioni con gli atomi e molecole dell'atmosfera producono la luce delle Aurore.





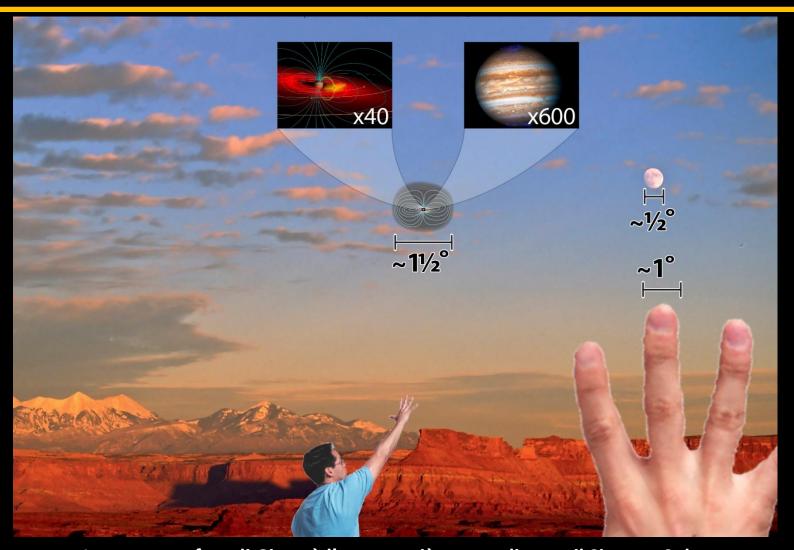
# Magnetosfere planetarie



Nel sistema solare tutti gli oggetti dotati di un campo magnetico intrinseco hanno una magnetosfera



## Magnetosfere planetarie

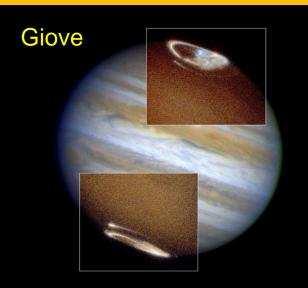


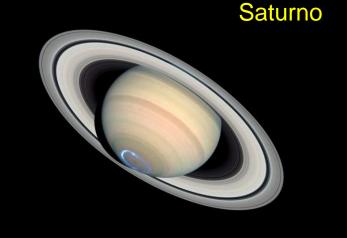
La magnetosfera di Giove è l'oggetto più esteso di tutto il Sistema Solare

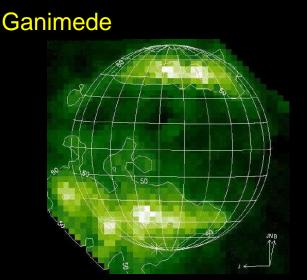


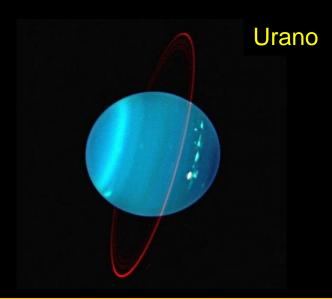


## **Aurore planetarie**







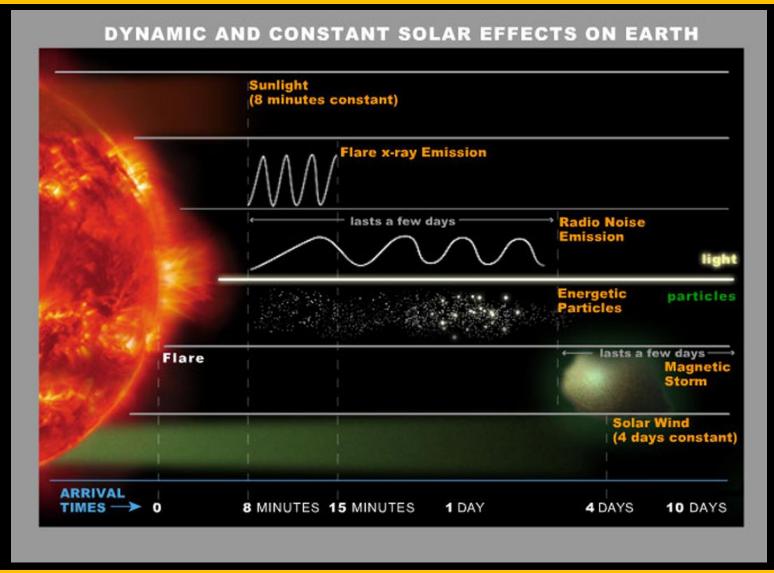




# Tempeste geomagnetiche



#### **Tempeste Geomagnetiche**





#### **Tempeste Geomagnetiche**

Fenomeni più evidenti legati ai processi di conversione dell'energia sono le aurore, oltre ai **disturbi del campo magnetico**, fenomeni collegati tra loro. Si distinguono:

- Magnetic storm: disturbi geomagnetici su scala globale, tempi scala da ore a giorni, associati ad intense aurore fino a basse latitudini
- Magnetic substorms: disturbi geomagnetici limitati più alle alte latitudini, tempi scala da minuti a ore, associati ad aurore più localizzate.

Una tempesta geomagnetica è definita dall'evoluzione del *Dst-index (Disturbance-storm time)*: misura media delle deviazioni della componente orizzontale di  $B_{Earth}$  misurata da diverse stazioni a bassa latitudine più sensibili ai campi indotti dalle ring currents. Il *Dst-index* è infatti una misura indiretta dell'intensità delle ring currents: il moto di deriva di p<sup>+</sup> verso Ovest e di e<sup>-</sup> verso Est produce una corrente totale in senso opposto alla rotazione terrestre  $\rightarrow$  ring currents producono un campo magnetico addizionale diretto verso Sud (<0)  $\rightarrow$  disturbo misurabile campo geomagnetico ( $B_F \sim 0.4 \text{ G} = 40 \text{ }\mu\text{T}$ )

Il picco negativo di *Dst-index* dà un'indicazione sull'intensità della tempesta magnetica:

-50 nT < Dst < -30 nT

→ weak storm

-100 nT < Dst < -50 nT

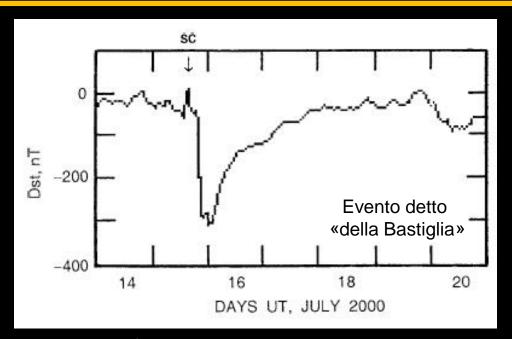
→ moderate storm

Dst < -100 nT

→ intense storm



#### **Tempeste Geomagnetiche**



Definizione tipica di magnetic storm

- Sudden Storm Commencement (SSC): improvviso (ore) aumento del Dst → compressione della magnetosfera dovuta all'arrivo della CIR o ICME
- **2.** Main phase: significative diminuzione del Dst  $\rightarrow$  produzione delle ring currents
- **3. Recovery phase:** recupero del Dst iniziale → espulsione del plasma aggiunto ad alta temperatura lungo le flowlines aperte che lo portano verso il dayside della magnetosfera, poi le ring currents decadono principalmente per charge exchange tra ioni e atomi neutri dell'esosfera, processo che rimuove prima gli ioni ad alta energia e poi progressivamente quelli a minore energia.

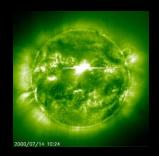




RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV, ATTIVITA' RADIO

- ✓ Danneggiamento delle sonde spaziali:
  - danneggiamento strumentazione elettronica
  - degradazione pannelli solari
  - degradazione rivelatori ottici
  - caduta per attrito atmosferico



PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

**EVENTI A PROTONI** 



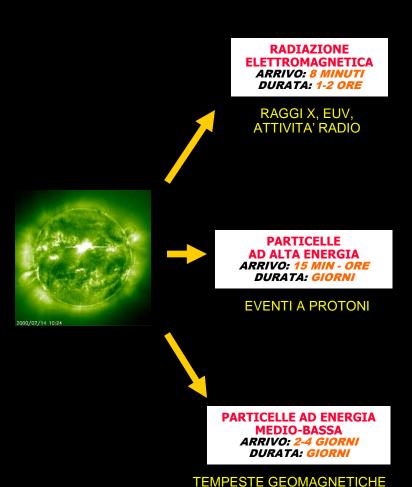
PARTICELLE AD ENERGIA MEDIO-BASSA ARRIVO: 2-4 GIORNI DURATA: GIORNI

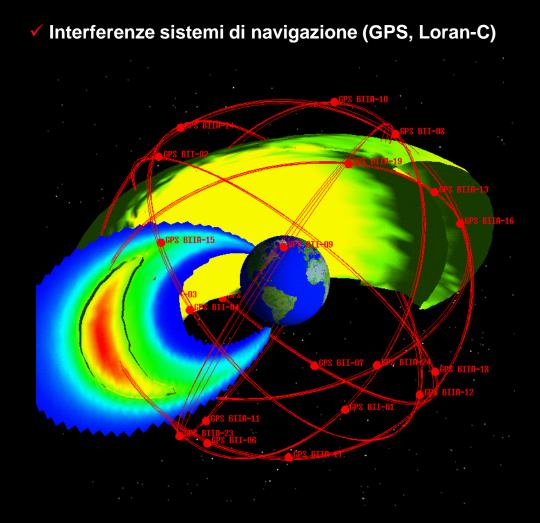
**TEMPESTE GEOMAGNETICHE** 







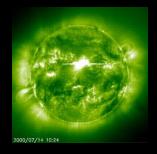






RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV, ATTIVITA' RADIO



PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

**EVENTI A PROTONI** 



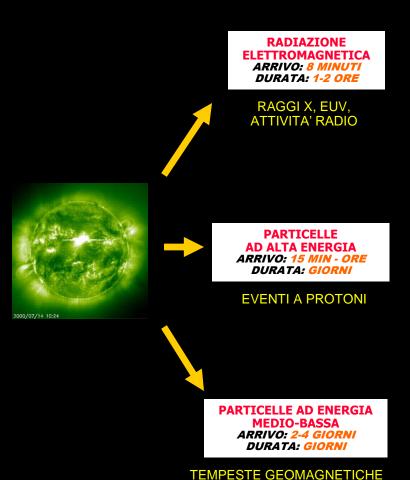
**TEMPESTE GEOMAGNETICHE** 

✓ Rischio radiazioni per astronauti

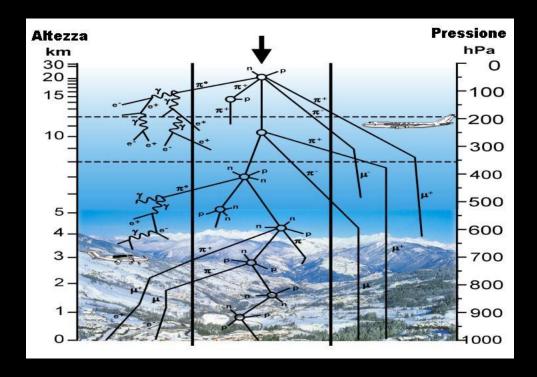




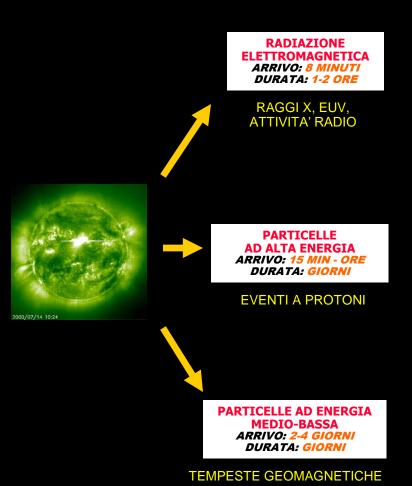




Radiazioni aerei ad alta quota







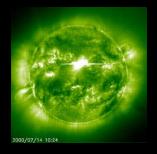
✓ Interferenze segnali radio





RADIAZIONE
ELETTROMAGNETICA
ARRIVO: 8 MINUTI
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV, ATTIVITA' RADIO



PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

**EVENTI A PROTONI** 

PARTICELLE AD ENERGIA MEDIO-BASSA ARRIVO: 2-4 GIORNI DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

- Correnti indotte sui sistemi di terra:
  - corrosione reti oleodotti/gasdotti
  - danneggiamento centrali elettriche

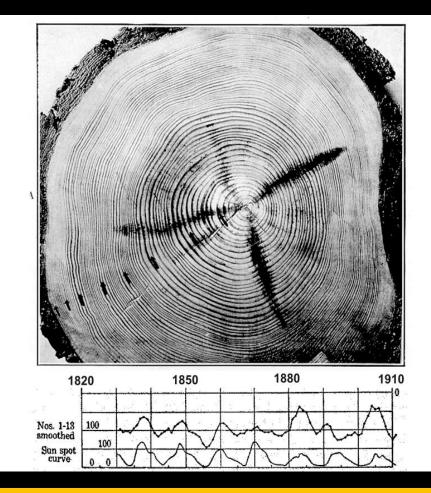






#### **RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA ARRIVO: 8 MINUTI DURATA: 1-2 ORE** RAGGI X, EUV, ATTIVITA' RADIO **PARTICELLE AD ALTA ENERGIA** ARRIVO: 15 MIN - ORE **DURATA: GIORNI EVENTI A PROTONI PARTICELLE AD ENERGIA MEDIO-BASSA** ARRIVO: 2-4 GIORNI **DURATA: GIORNI**

#### ✓ Variazioni climatiche



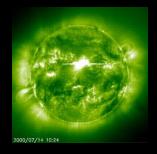




**TEMPESTE GEOMAGNETICHE** 

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA ARRIVO: 8 MINUTI DURATA: 1-2 ORE

> RAGGI X, EUV, ATTIVITA' RADIO



PARTICELLE
AD ALTA ENERGIA
ARRIVO: 15 MIN - ORE
DURATA: GIORNI

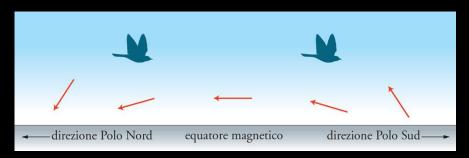
**EVENTI A PROTONI** 



**TEMPESTE GEOMAGNETICHE** 

✓ Disorientamento di alcuni animali migratori

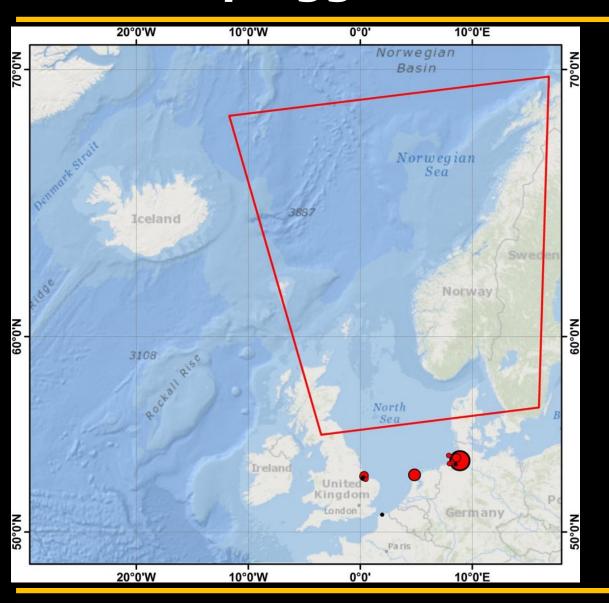








#### Spiaggiamenti di balene



Panoramica dal Mare di Norvegia alle Azzorre, il riquadro rosso indica l'area interessata dalle misure del campo magnetico, mentre i punti neri e i cerchi rossi indicano i luoghi e l'entità degli spiaggiamenti di capodogli a inizio 2016. Crediti: Vanselow et al. (2017)

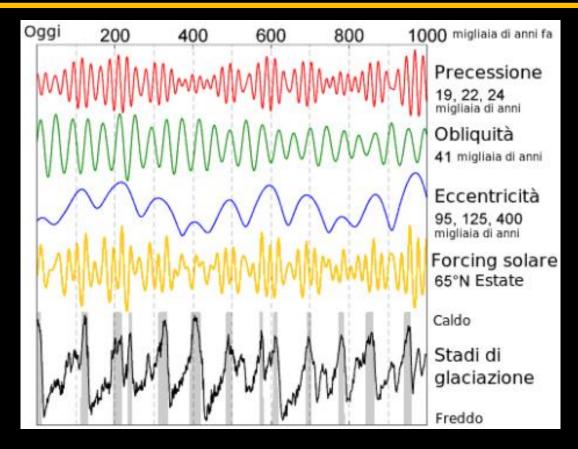






# Sole e climatologia terrestre

## Sole e climatologia terrestre (1)



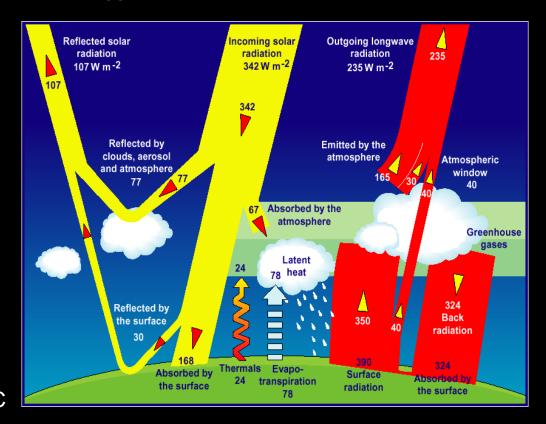
L'alternanza di periodi glaciali ed interglaciali nelle ere geologiche passate è ben spiegata a partire da variazioni millenarie di diverse proprietà dell'orbita terrestre (precessione degli equinozi, variazione obliquità asse di rotazione, variazione eccentricità dell'orbita) → possibile prevedere le prossime ere glaciali sulla base dei cicli di Milankovic.



## Sole e climatologia terrestre (2)

- Effetti dell'atmosfera terrestre:
- Assorbimento raggi cosmici:
   particelle ad alta energia (p+ e nuclei
   atomici) dal Sole e dallo spazio
   assorbite dall'alta atmosfera →
   protezione da radiazioni pericolose
- 2. Assorbimento radiazione EUV dal Sole: grazie ad O molecolare (O₂) ed ozono (O₃ distrutto dai Cloro-fluoro-Carburi) le radiazioni EUV sono in gran parte assorbite → protezione da radiazioni pericolose
- 3. Assorbimento radiazione IR dalla Terra: la Terra scaldata dal Sole riemette radiazione IR assorbita dall'atmosfera grazie a H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> → effetto serra «buono», in assenza di atmosfera la T media di equilibrio terrestre sarebbe -18°C invece di 16°C

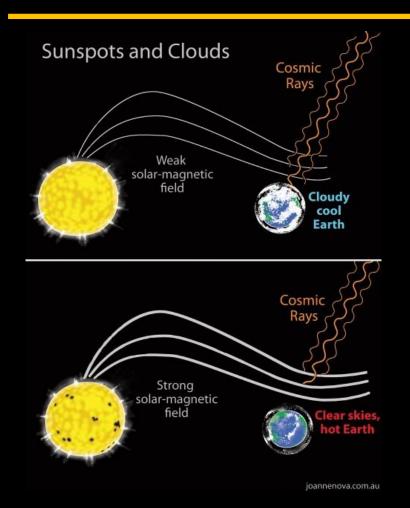
 Variabilità solare: la quantità di luce emessa dal Sole varia dello 0.15%, ma variazioni 10 volte maggiori nell'UV. L'attività solare modula il flusso di raggi cosmici.







# Sole e climatologia terrestre (3)



 Altri fattori: parametri orbitali della Terra, vulcanesimo, chimica atmosfera, etc...

#### Nuvole

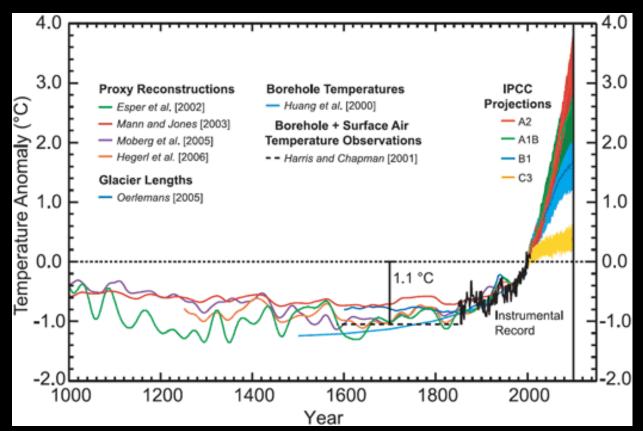
Assorbimento e riflessione della luce solare → raffreddamento globale, forse tasso di formazione delle nubi legato al flusso di raggi cosmici a sua volta modulato dal ciclo solare

- Particolato atmosferico (grani ~nm-µm):
  - Riflessione della luce solare ed aumento formazione delle nubi → raffreddamento globale
  - 2. Diminuzione della capacità di riflessione dei ghiacci polari → aumento H₂O → riscaldamento globale
- Albedo planetaria (ossia quanta luce assorbe/riflette il suolo):
  - Oceani hanno albedo ~ a quella dell'asfalto
     → fusione ghiacci oceanici → aumento
     albedo → riscaldamento globale
  - 2. Deforestazione → aumento albedo → riscaldamento globale



#### Sole e riscaldamento globale

#### Comprensione di tutti i fenomeni è molto complessa →



Evoluzione climatica da misure e ricostruzioni a partire dal 1000 d.C. fino ad oggi e possibili previsioni per il futuro se avessimo fermato l'inquinamento nel 2000 (giallo) oppure no (altri colori per modelli diversi).

# Intergovernmental Panel on Climate Change

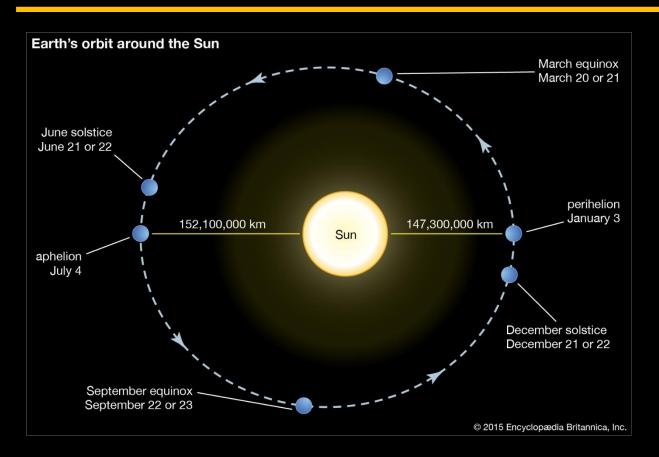
(Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico, IPCC) è il foro scientifico formato nel 1988 dalle Nazioni Unite, allo scopo di studiare il riscaldamento globale.

Cinque rapporti di valutazione pubblicati → anche considerando tutti gli effetti di origini naturali ed umane, le attività umane restano le principali responsabili del riscaldamento globale degli ultimi 40 anni. Il Sole direttamente responsabile per un aumento solo di ~0.1°C.





#### Orbita terrestre: attività



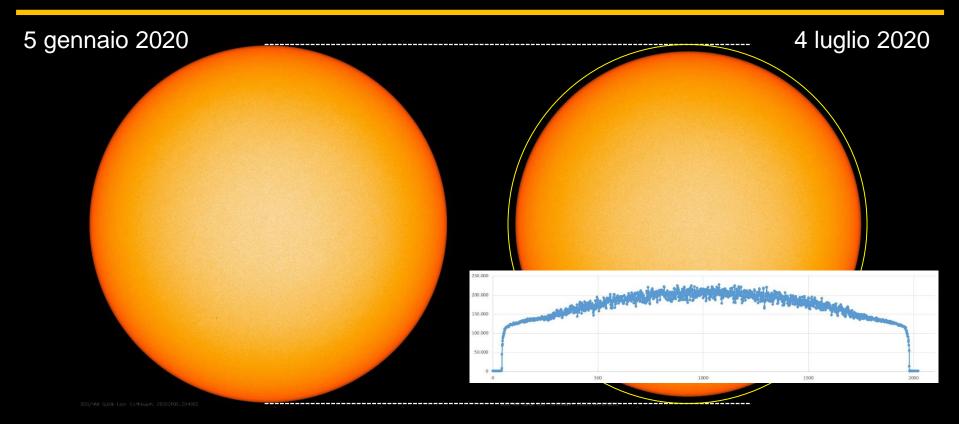
Misura dell'eccentricità dell'orbita terrestre: utilizzando le immagini del Sole riprese ad esempio dal satellite SDO a Gennaio (perielio) e poi a Luglio (afelio) di un anno.



Tra perielio ed afelio la distanza Terra-Sole varia di poco meno di 5 M km → pari a circa il 3.2% → l'irraggiamento solare varia circa del 6.6%



#### Orbita terrestre: attività

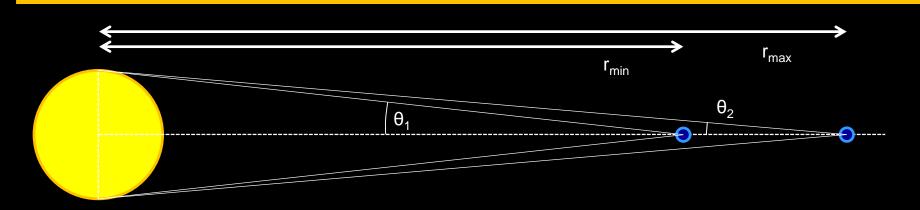


Year	Perihelion	Aphelion
2020	January 5, 2020 2:47 am	July 4, 2020 7:34 am
2021	January 2, 2021 8:50 am	July 5, 2021 6:27 pm
2022	January 4, 2022 1:52 am	July 4, 2022 3:10 am
2023	January 4, 2023 11:17 am	July 6, 2023 4:06 pm

https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/aiahmi/ HMI Intensitygram (orange) Frames download 2048 x 2048 pixels



#### Orbita terrestre: attività



Dai raggi del sole misurati in pixels  $R_1$  e  $R_2 \rightarrow$  conoscendo la scala in arcsec/pixel si misurano gli angoli  $\theta_1$  e  $\theta_2$  quindi (convertendo gli angoli da arcsec a radianti)

$$r_{min} = \frac{R_{sun}(km)}{\tan \theta_1} \approx \frac{R_{sun}(km)}{\theta_1}$$
  $r_{max} = \frac{R_{sun}(km)}{\tan \theta_2}$ 

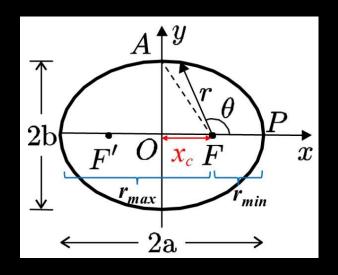
$$r_{max} = \frac{R_{sun}(km)}{\tan \theta_2}$$

$$2a = r_{max} + r_{min}$$

$$b = \sqrt{r_{min}r_{max}}$$

$$e = \sqrt{1 - r_0/a} \cong 0.0167$$

$$r_0 = \frac{2r_{min}r_{max}}{r_{min} + r_{max}}$$





# Sole e Terra: alcune "big questions"

#### RISCALDAMENTO CORONALE

Molti fenomeni possibili per spiegare sia le alte temperature coronali, sia l'accelerazione del vento solare → non sappiamo quale fenomeno domini → limitata comprensione fisica del plasma

#### CICLO SOLARE

Conoscenza limitata dei moti di plasma all'interno del sole → limitata comprensione della dinamo solare → incapacità previsione del ciclo solare

#### ATTIVITA' SOLARE

Conoscenza limitata dei processi fisici alla base delle eruzioni solari → limitata comprensione delle loro cause → incapacità previsioni eruzioni solari

#### METEOROLOGIA SPAZIALE

Conoscenza limitata delle interazioni tra tempeste solari e magnetosfera terrestre → limitata comprensione cause tempeste geomagnetiche → incapacità previsioni di meteorologia spaziale

#### CLIMATOLOGIA TERRESTRE

Comprensione non completa delle complesse sequenze causa-effetto che a partire dal Sole generano il clima sulla Terra → incapacità previsioni climatologiche





https://www.youtube.com/watch?v=oHHSSJDJ4oo

